N° 488 • 6,40€ JUIN 2014

LA Recherche

L'actualité des sciences

BITCOIN
LA MONNAIE DEVIENT NUMÉRIQUE

Horloges cellulaires
Comment elles contrôlent nos rythmes et notre santé

MENSUEL DOM 7,40 € BEL 7,40 € LUX 7,40 € D 8,20 € ESP 7,40 € GR 7,40 € ITA 7,40 € PORT.CONT 7,40 € CAN 10,5 $ CAN CH 12,40 FS MAR 63 DH TUN 6,50 TND MAYOTTE 8,80 € TOM SURFACE 970 XPF TOM AVION 1620 XPF - ISSN 00295671

M 01108 - 488 - F: 6,40 € - RD

NOUVEAU ! LA DISCOTHÈQUE IDÉALE DE DIAPASON

Volume I

MOZART

musique de chambre

33 chefs-d'œuvre
Plus de 12 h d'écoute !
Edition limitée

Des interprétations de référence sélectionnées par la rédaction du magazine DIAPASON

Coffret 10 CD
+ Livret 16 pages
24,90 €

Disponible dès le 30 mai 2014

À commander sur www.kiosquemag.com

Également disponible en magasin, sur les sites de vente par correspondance et les plateformes de téléchargement.

qobuz · Télécharger sur iTunes · amazon

La Recherche

Sophia Publications
74, avenue du Maine 75014 Paris
Tél. : 01 44 10 10 10
Fax : 01 44 10 54 30
e-mail rédaction : courrier@larecherche.fr

Pour joindre directement par téléphone un membre de la rédaction, composez le 01 44 10, suivi des quatre chiffres placés après son nom. Par mail, libellez l'adresse sur le modèle : prenom.nom@larecherche.fr (sans accents).

La Recherche est publiée par **Sophia Publications,** filiale de Sophia Communications.

Président-directeur général et directeur de la publication **Philippe Clerget**

ABONNEMENTS

Tarif France :
1 an 12 n°s, 67 €
1 an 12 n°s + 6 Dossiers de La Recherche, 99 €

Tarif international : nous contacter.
Tél. : 01 55 56 71 15
00 (33) 1 55 56 71 15

E-mail : abo.recherche@groupe-gli.com

Adresse : Service abonnements La Recherche, 17 route des Boulangers 78926 Yvelines Cedex 9

Suisse : Edigroup
Tél. : (0041) 22 860 84 01.

Belgique : Edigroup
Tél. : (0032) 70 233 304

Achat de revues et d'écrins
La Recherche – BP65 - 24, chemin latéral 45390 Puiseaux – 02 38 33 42 89

Directrice de la rédaction **Aline Richard**

Assistante **Gabrielle Monrose (54 38)**

Rédacteur en chef **Luc Allemand**

Rédactrices en chef adjointes **Sophie Coisne (54 20)** **Hélène Le Meur (54 21)**

Secrétaire générale de la rédaction **Catherine Caltaux (54 16)**

Chef des informations **Cécile Klingler (54 18)**

Chef de service **Marie-Laure Théodule (54 22)**

Rédacteurs **Rémi Canali (54 24)** **Vincent Glavieux (54 29)**

Conception graphique et direction artistique **Vincent Sainte Fare Garnot (54 13)**

1re rédactrice graphiste **Michèle Bourgeois (54 15)**

Service photo **Anne Viratelle (54 14)**

Secrétaire de rédaction **Morvan Léon (54 17)**

Responsable fabrication **Christophe Perrusson (13 78)**

Activités numériques **Emmanuelle Gérardin (54 52)**

A collaboré à ce numéro **Valérie Delchambre** **Clément Delorme**

Directrice déléguée gestion et numérique **Dounia Ammor**

Responsable communication **Élodie Dantard (54 55)**

Directrice des ventes et promotion **Evelyne Miont (13 80)**

Vente messageries VIP-diffusion **Frédéric Vinot numéro vert 0800 51 49 74**

Directrice commerciale et marketing **Virginie Marliac (54 49)**

Responsable du marketing direct **Linda Pain (54 51)**

Responsable gestion abonnements **Isabelle Parez (13 60)**

Responsable comptabilité **Sylvie Poirier (12 89)**

Diffusion librairies **DIF'POP'. Tél. : 01 40 24 21 31 Fax : 01 40 24 15 88**

Directrice commerciale publicité et développement **Caroline Nourry (13 96)**

Directeurs de clientèle **Antoine Faure (12 57)** **Eddie Barazzuol (12 12)**

Responsable de clientèle, secteur culture **Françoise Hullot (12 13)**

Imprimerie **G. Canale & C.**, Via Liguria 24, 10071 Borgaro (TO), Italie.

Dépôt légal à parution.

OJD PRESSE PAYANTE Diffusion Certifiée 2012

Les titres, les intertitres, les textes de présentation et les légendes sont établis par la rédaction du mensuel. La loi du 11 mars 1957 interdit les copies ou reproductions destinées à une utilisation collective. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur, ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite (article L.122-4 du Code de propriété intellectuelle). Toute copie doit avoir l'accord du Centre français du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris. Tél. : 01 44 07 47 70. Fax : 01 46 34 67 19). L'éditeur s'autorise à refuser toute insertion qui semblerait contraire aux intérêts moraux ou matériels de la publication.

Commission paritaire : 0909 K 85863. ISSN 0029-5671

Science privée

PAR **Aline Richard**
directrice de la rédaction

Un récent article du New York Times [1] *s'est ému de la tendance à la privatisation de la science américaine par des « milliardaires aux grandes idées » : le relatif désengagement de l'État dans le financement de la science, tensions budgétaires obligent, laisse une large place à de riches philantrophes qui délient les cordons de leur bourse pour la médecine (Bill et Melinda Gates), la physique et les mathématiques (Mark Zuckerberg), ou encore l'exploration du cerveau (Jeff Bezos). La liste est assez longue et contraste avec le désert français où les mécènes préfèrent investir dans l'art plutôt que dans la science (par exemple Bernard Arnault ou François Pinault). Que l'on s'inquiète de ce mouvement de privatisation ou qu'on l'approuve, le fait est là, en tout cas Outre-Atlantique. Remarquons, c'est important, que la distribution de cet argent privé ne relève pas forcement du fait du prince, grâce au système des « X Prize ». Ces compétitions grassement dotées par de prestigieux ménèces sont ouvertes à tous et veulent favoriser l'émergence de découvertes de rupture pour le bien de l'humanité, tout en permettant la création de nouvelles industries et de marchés. Après le spatial et l'automobile, un X Prize pour la préservation des océans vient d'être lancé par Wendy Schmidt, la femme du patron de Google.*

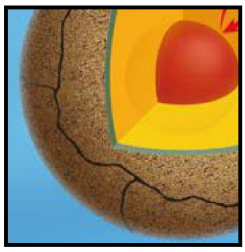
© PHOTO DAHMANE

[1] « Billionnaires With Big Ideas Are Privatizing American Science », *NYT*, 15 mars 2014.

ctualités

3 **Éditorial**

6 **Courrier**



8 **Événement**
Les premières fractures de l'écorce terrestre

12 **Neurologie**
Des paraplégiques bougent volontairement leurs jambes

13 **Archéologie**
Aqueducs préservés à l'époque byzantine

14 **Écologie**
Guerre chimique chez les fourmis
Planétologie
Quel site d'atterrissage pour le rover ExoMars

15 **Psychiatrie**
« Les essais cliniques ne viseront plus uniquement les symptômes »

16 **Environnement**
La mer Baltique étouffe de plus en plus
Prix Abel La physique-mathématique à l'honneur

18 **Neurosciences**
Un atlas neuronal des comportements
Planétologie
Messenger affine Mercure

19 **Paléontologie**
Fougère endormie

20 **Biologie**
Premier chromosome synthétique d'une cellule complexe
Technologie
La nacre inspire des céramiques moins fragiles

21 **Web du mois**
Des hommes et des loups
Cancérologie
Pourquoi un traitement ciblé se trompe parfois de cible

22 **Physique** Un excès de rayons gamma d'origine inconnue
Écologie Les chiffres de la chasse à la baleine

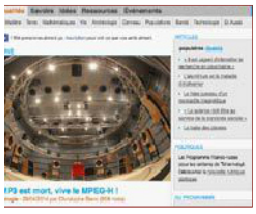
24 **Technologie**
Quand l'électronique colle à la peau
Archéologie Comment Neandertal chassait-il le mammouth ?

25 **Politiques** L'europe bloque sur les biocarburants
Big Data : quel bénéfice pour le Sud ?

Dossier spécial p. 41

Stockage d'énergies
réalisé avec le soutien de l'ADEME, de l'ATEE, de GDF SUEZ et de l'IFP Energies nouvelles

www.larecherche.fr



POUR RECHERCHER
> Les archives du magazine : Trouvez les sujets qui vous intéressent dans une base de plus de 20 000 articles

POUR S'INFORMER
> L'actualité de la recherche, le blog des livres et l'agenda des manifestations scientifiques

POUR ACHETER
> Abonnement et vente d'anciens numéros
> Livres sélectionnés par *La Recherche*, outils du chercheur

La Recherche sur Twitter... Rejoignez-nous sur Twitter pour un éclairage original sur la science et les technologies **http://twitter.com/maglarecherche**

abonnés annonçant le lancement de Sophia Boutique.

savoirs

26 **Dossier**

Horloges cellulaires : comment elles contrôlent nos rythmes et notre santé

28 Ces horloges qui rythment notre vie
par Cécile Klingler

32 Un organisme réglé comme une pendule
par Cécile Klingler

34 Cancer : frapper au bon moment
par Francis Lévi

37 Quand perdre le rythme fait prendre du poids par Anne Debroise

48 **Politique**
Canada : la recherche fondamentale menacée par Dominique Forget

52 **Médecine**
Peut-on soigner la trisomie 21 ?
par Emily Underwood

58 **Planétologie**
Les révélations d'une météorite martienne par Dominique Padirac

62 **Paléontologie**
La tardive diversification des mammifères par Lise Barnéoud

66 **Portrait Emmanuel Breuillard**
« J'ai une approche pluridisciplinaire des mathématiques » par Philippe Pajot

Spécial Bitcoin

69 La ruée vers l'or numérique par Jean-Philippe Braly

72 Bitcoin est-il une valeur sûre ?
par Olivier Markowitch, Charles Cuvelliez et Étienne Marique

idées

78 **L'entretien du mois**
avec Pierre-Benoît Joly
« La biologie de synthèse a besoin de la sociologie »
propos recueillis par Marie-Laure Théodule

82 **Déchiffrage**
Solde migratoire zéro dans le monde en 2100
par Hervé Le Bras

83 **Le grand débat**
Faut-il craindre la fin de l'écriture manuscrite ?
avec Jean-Luc Velay et Philippe Artières

92 **Histoire de science**
1914 : Carrel et Dakin se battent pour l'antisepsie
Par Éric Sartori

87 **Les livres**

96 **L'agenda**

98 **Curiosités**

Nucléaire et organismes indépendants

Nucléaire

À Fukushima, du courage, mais pas trop d'illusions

Vous parlez d'« organismes indépendants » chargé de la mise en œuvre de l'échelle des accidents nucléaires (*La Recherche* n° 485, p. 65). Indépendants de qui ? Des entreprises nucléaires, ou des antinucléaires ? Ne touche pas à ma science car la science ne dépend de personne, elle est !

• *Courriel de Claude Jarrige-Lemas*

Réponse de Céline Kermisch

Il ne s'agit bien sûr pas de remettre en question l'autonomie de la science, mais de s'interroger sur la pertinence d'un outil d'information que constitue l'échelle INES. C'est dans cette perspective que nous suggérons qu'il soit utilisé par un organisme indépendant et pluraliste. Si « indépendant » signifie « qui n'est subordonné à aucune autorité », il va de soi que l'organisme pluraliste appelé à manipuler l'outil que constitue l'échelle INES dépasse les clivages idéologiques.

La sécurité des centrales

En 1996, mon équipe du CNRS, associée à l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire, a mené une étude financée par EDF relative à la prévention de l'explosion résultant d'une défaillance du circuit de refroidissement primaire d'un réacteur. C'est ce type d'accident qui est survenu à Fukushima. À l'inverse de celui de la centrale de Tchernobyl, les réacteurs PWR ou BWR sont équipés d'une enceinte de confinement du combustible en béton. Le problème est que si les pompes du circuit primaire sont brusquement inopérantes en raison d'une défaillance globale de l'alimentation électrique causée par un tsunami, un tremblement de Terre ou par l'obstruction des conduits d'arrivée d'eau, la chaleur produite par la réaction nucléaire qui se poursuit n'est plus évacuée et provoque un échauffement important du combustible et l'oxydation violente de ses gaines. Il se produit alors un dégagement d'hydrogène pouvant atteindre 70 000 mètres cubes. Par la suite, la formation d'hydrogène se poursuit par hydrolyse de l'eau et l'attaque du béton soutenant la cuve du réacteur, lorsque celle-ci fond partiellement. Comme l'enceinte du réacteur contient de l'oxygène de l'air (et de la vapeur d'eau), le mélange peut exploser.

C'est ce qui est arrivé au Japon, où l'enceinte a volé en éclat et où les produits de fission se sont répandus dans la nature. L'étude conduite par notre équipe consistait à vérifier que l'on pouvait concevoir un réacteur catalytique capable d'oxyder cet hydrogène de façon passive (sans apport d'énergie) avec une masse catalytique capable de résister aux poisons générés par l'atmosphère très polluante. Ce fut une réussite avec la mise au point de catalyseurs bimétalliques palladium-platine résistant à l'iode et au soufre. Il semble que les réacteurs en Europe soient depuis dix ans équipés de tels dispositifs, qui n'existaient pas dans les centrales japonaises conçues et gérées par Tepco. Cela souligne l'importance d'un organisme de contrôle indépendant de l'industriel exploitant les centrales.

• *Courriel d'Albert Renouprez, directeur de recherche émérite au CNRS*

Conflits d'intérêts

Dans la présentation du débat sur l'efficacité des statines (*La Recherche* n° 485, p. 91), il aurait été utile de citer dans son intégralité l'avis de la Haute Autorité de santé du 14 février 2013 : « *La HAS constate un certain mésusage des statines en France : un recours abusif aux statines en prévention primaire – en regard notamment des effets secondaires possibles de ces molécules – chez des personnes qui ne sont pas à haut risque, en même temps qu'un défaut de prescription de statines chez des patients qui le justifieraient.* » Vos lecteurs auraient pu comparer avec l'affirmation de Pierre Corvol concernant « *leurs effets bénéfiques chez les adultes n'ayant pas encore eu d'accident de ce type* ». La grande majorité des professeurs de nos facultés de médecine ont une relation – financière ou non – avec l'industrie. Compte tenu des énormes intérêts financiers en jeu il serait nécessaire de connaître les déclarations d'intérêts, si elles existent, des contributeurs que vous sollicitez. Toutefois, après le communiqué alarmant du conseil national de l'Ordre des médecins, qui « *ne peut que constater la priorité accordée aux exigences des industriels du médicament* » et s'indigne contre un décret d'application qui « *trahit manifestement la volonté du législateur et la loi du 29 décembre 2011 relative à la transparence des activités des industriels de la santé* », je doute que vous puissiez éclairer vos lecteurs sur ce dernier point.

• *Courriel de Roger Klein*

Réponse de Pierre Corvol

Les grands journaux scientifiques médicaux demandent habituellement à leurs auteurs de déclarer leurs éventuels conflits d'intérêts. En ce qui concerne les statines, le communiqué que nous avions fait, les professeurs Joël Ménard, Jean-François Bach et moi-même à l'Académie nationale de médecine en 2013, sera publié prochainement dans le *Bulletin de l'Académie nationale de médecine*. Il sera accompagné de la déclaration d'absence de conflit d'intérêts de notre part.

Réponse de Michel de Lorgeril

Je n'ai aucune relation avec l'industrie du médicament, qu'il s'agisse de statines ou d'autres produits. Je suis à cet égard parfaitement libre et indépendant (vis-à-vis des statines ou de tout autre médicament commercialisé par des sociétés qui commercialisent des statines aussi) comme devrait l'être tout chercheur ou universitaire rémunéré par l'État, l'Université ou le CNRS. J'ai, *via* la faculté de médecine de Grenoble, des contrats de recherche avec l'Union européenne et des industriels de l'agroalimentaire, sans aucune espèce de lien avec le moindre médicament.

Sauf mention contraire de leur auteur, toute lettre parvenue à la rédaction de *La Recherche* est susceptible d'être éditée et publiée, en tout ou en partie, dans le journal. Les lettres concernant un auteur extérieur à la rédaction de *La Recherche* lui sont envoyées. Sans réaction de l'auteur dans un délai raisonnable, nous les considérons comme publiables en tout ou en partie, sans attendre une éventuelle réponse de sa part. Dans la mesure du possible, évitez les fax et les lettres manuscrites.

SANTÉ ET ASSURANCE

Protégez au mieux votre capital santé

GRÂCE À SANTE PASS ET PROTECTION REVENU, DEUX CONTRATS CONÇUS PAR LA GMF, VOUS ASSUREZ VOTRE SANTÉ ET PRÉSERVEZ EFFICACEMENT VOTRE NIVEAU DE VIE.

La santé occupe une place de plus en plus importante dans le budget des ménages, à tel point que près d'un tiers des Français renoncent à des soins faute d'argent. Consciente de cette tendance, la GMF a conçu SANTE PASS, une complémentaire santé de qualité, particulièrement compétitive. Souple et modulable selon les besoins, le contrat SANTE PASS réserve un ensemble d'avantages tarifaires : jusqu'à 18% de réduction selon le nombre de personnes assurées[1], 6 mois gratuits pour les bébés[2]… Le tout pour une protection étendue : les dépassements d'honoraires, de plus en plus fréquents, sont remboursés jusqu'à 220% ; pratiquement tous les médicaments – y compris ceux remboursés à 15% par la Sécurité sociale[3] – sont pris en charge. De plus, vous avez accès à des tarifs négociés et des services privilégiés (en optique, dentaire…) grâce aux réseaux Santéclair[3], qui rassemblent plus de 5000 professionnels de la santé.

PROTÉGEZ VOS REVENUS

Et parce que les fonctionnaires ne sont pas forcément bien couverts en cas d'arrêt de travail pour maladie ou accident de la vie privée, la GMF a conçu Protection Revenu. Cette garantie vous permet de maintenir votre niveau de vie en cas de coup dur : l'indemnisation est calculée sur la base de votre traitement, mais aussi de vos primes. Protection Revenu peut être souscrit avec le produit SANTE PASS ou de façon totalement indépendante. Pensez-y !

[1] Ensemble des assurés avec une seule et même formule au contrat.
[2] Si l'inscription de l'enfant a lieu dans les 3 mois qui suivent sa naissance ou son adoption.
[3] Sauf formule Eco.

Protection Revenu en pratique

POUR QUI ? Protection Revenu est accessible à tous les fonctionnaires et contractuels de la Fonction publique âgés de 18 à 65 ans. Une simple déclaration de bonne santé est demandée à partir de 30 ans.

COMMENT ÇA MARCHE ? En cas d'arrêt de travail, le contrat permet à l'assuré de conserver un revenu moyen similaire à ce qu'il percevait l'année précédente. Il choisit son montant garanti et peut le faire évoluer.

LE PLUS ? L'indemnisation tient compte aussi des primes.

POUR QUELLE DURÉE ? Jusqu'à 5 années consécutives d'indemnisation.

Ludovic Champenois, Responsable Produit à la GMF

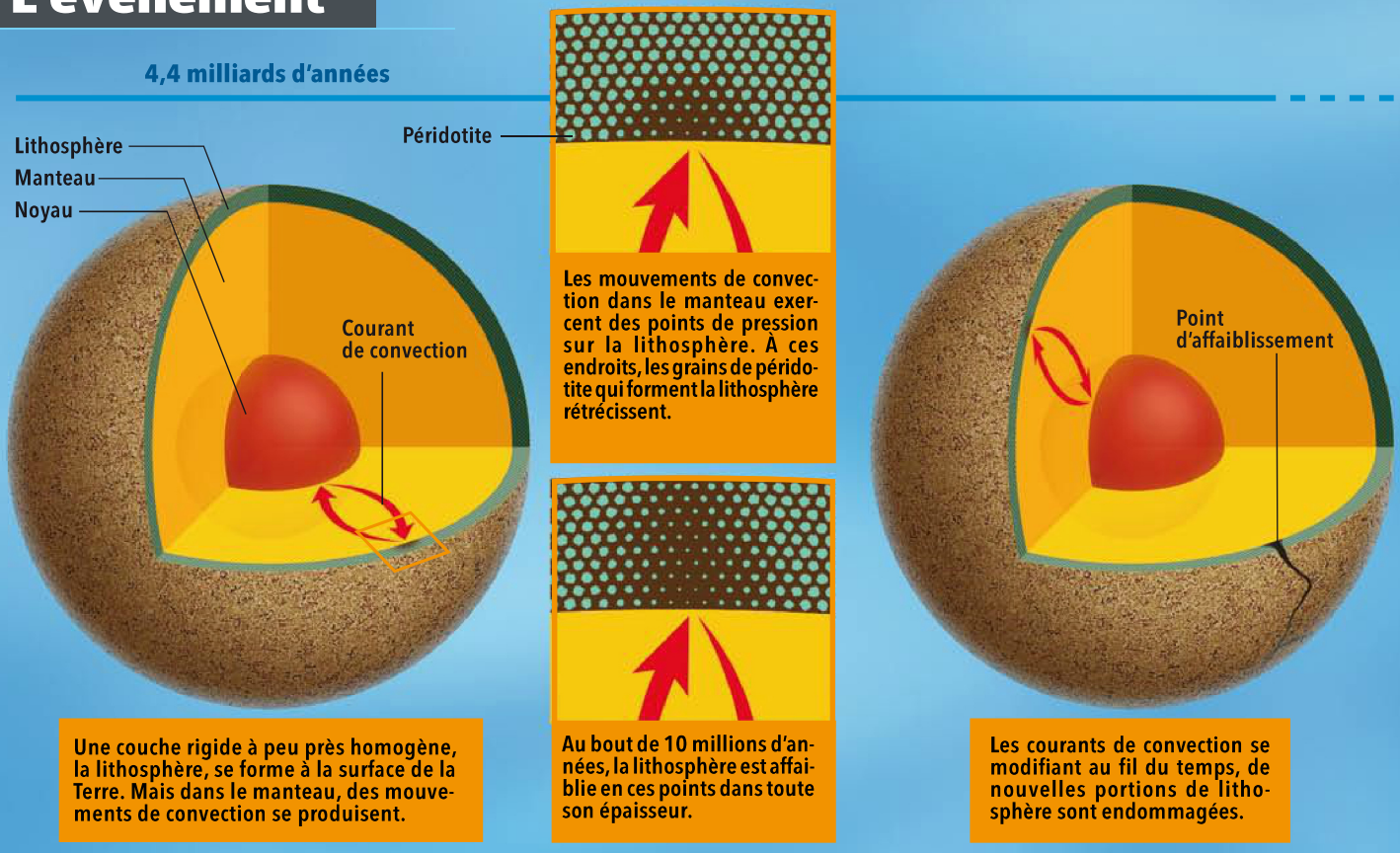
«Le choix d'une complémentaire santé est libre»

« On dit souvent que la santé est ce qu'il y a de plus important. Raison de plus pour passer à la loupe son assurance complémentaire santé et faire jouer la concurrence. Rappelons que le choix d'une complémentaire est libre, une règle qui vaut aussi pour les fonctionnaires. Insistons aussi sur le fait qu'au bout d'un certain temps, en général à partir du 4ème mois d'arrêt de travail, les fonctionnaires ne perçoivent plus que la moitié de leur traitement. Mieux vaut donc avoir anticipé ! C'est ce qui nous a guidés dans la conception de Protection Revenu, le complément prévoyance du contrat SANTE PASS ».

Pour en savoir plus sur ces deux contrats : appelez le 0 970 809 809 (n° non surtaxé) ou connectez-vous sur www.gmf.fr

GMF

SEREC Communication / mars 2014 - Photo Getty Images - GMF : 76 rue de Prony 75857 Paris Cedex 17



Les premières fractures de l'écorce terrestre

Par **Julien Bourdet,** journaliste.

Un modèle explique pour la première fois comment la surface de notre planète, faite d'un seul tenant à l'origine, s'est découpée en plaques mobiles les unes par rapport aux autres.

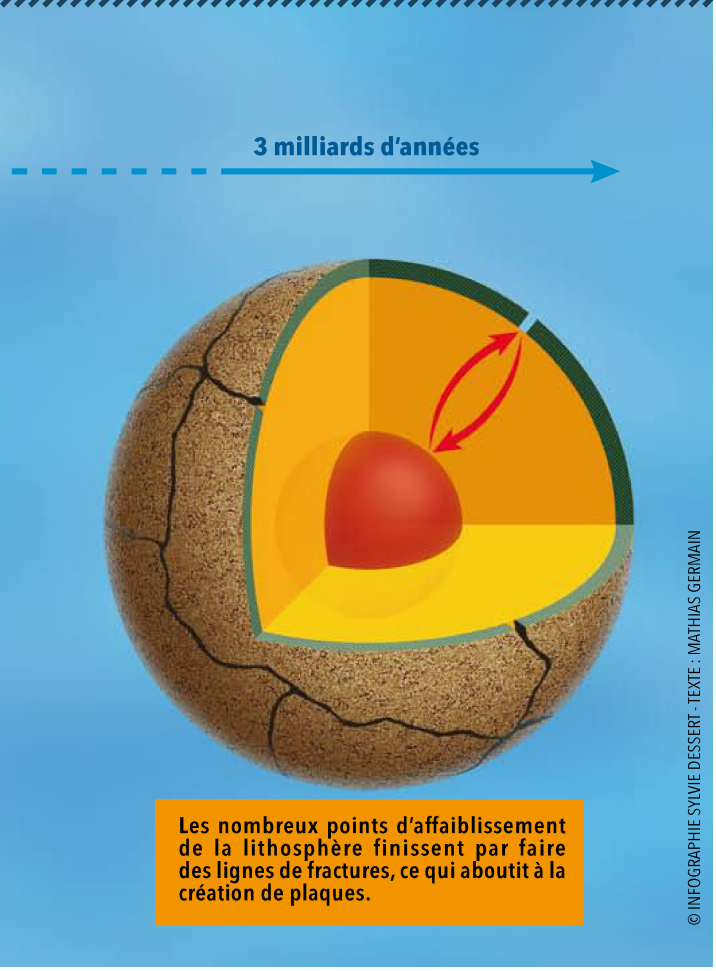
Tel un gigantesque puzzle, la surface de la Terre est découpée en plaques rocheuses qui se déplacent les unes par rapport aux autres. Ce phénomène de tectonique des plaques, unique dans le système solaire, change sans cesse le visage de notre planète : il est à l'origine de la dérive des continents, de la formation des chaînes de montagnes, du volcanisme et des tremblements de terre (lire « Un puzzle géant », p. 10).

Depuis la fin des années 1960, les scientifiques connaissent le responsable de cette danse : les mouvements de convection de la matière à l'intérieur du manteau*, sous l'enveloppe rigide de notre planète, la lithosphère*, qui forme les plaques. Sous l'effet de la chaleur dégagée dans les entrailles de la Terre, les roches les plus profondes remontent vers la surface. Puis, refroidies, elles redescendent. Ces mouvements exercent des tensions sur la lithosphère, écartant les plaques à certains endroits, les rapprochant à d'autres.

Mais comment ces plaques se sont-elles formées ? Comment la lithosphère, qui était à l'origine d'un seul tenant, s'est-elle scindée en plusieurs blocs mobiles ? Jusqu'à présent, aucun modèle ne parvenait à expliquer ce

*LE MANTEAU correspond à la partie du globe terrestre située entre la croûte et le noyau.

*LA LITHOSPHÈRE est l'enveloppe terrestre rigide de la Terre. Elle comprend la croûte terrestre et la partie supérieure rigide du manteau.



Les nombreux points d'affaiblissement de la lithosphère finissent par faire des lignes de fractures, ce qui aboutit à la création de plaques.

© INFOGRAPHIE SYLVIE DESSERT - TEXTE : MATHIAS GERMAIN

point de départ crucial. Mais celui que viennent de proposer Yanick Ricard, de l'École normale supérieure de Lyon, et David Bercovici, de l'université Yale, aux États-Unis, comble ce vide [1].

Aujourd'hui, les géologues ne possèdent que très peu de traces du passé reculé de la Terre – du fait même du recyclage permanent de sa surface par la tectonique des plaques. Quelques rares indices laissent toutefois penser que notre planète possédait déjà une enveloppe rigide il y a environ 4,4 milliards d'années – soit très peu de temps après sa formation – et que son morcellement s'est amorcé il y a 4 milliards d'années pour s'achever un milliard d'années plus tard.

Taille des minéraux. Que s'est-il passé pendant cet intervalle de temps ? Pour le savoir, Yanick Ricard et David Bercovici ont modélisé en deux dimensions la lithosphère originelle et son évolution sous l'effet des tensions exercées par les mouvements de convection. Mais ils ne se sont pas contentés d'introduire dans leur modèle les paramètres classiques tels que la température, la pression et la viscosité des roches. Ils ont aussi simulé en détail les phénomènes qui se produisent à l'échelle des minéraux dans les roches lithosphériques, lorsqu'elles subissent une intense déformation.

Dans leur modèle, ces roches sont essentiellement des péridotites, composées d'un mélange de deux minéraux, l'olivine et le pyroxène. Des expériences en laboratoire avaient déjà montré que la taille des grains millimétriques qui les constituent tend à diminuer lorsque la roche est déformée, ce qui rend cette dernière encore plus sensible à la déformation. Il en résulte un effet « boule de neige » : de plus en plus fragilisées, les roches finissent par casser. D'où l'idée que ce phénomène soit à l'origine de la première fragmentation.

Cécile Grigné, du laboratoire domaines océaniques à l'université de Bretagne occidentale, salue l'originalité de cette démarche : « *Les géophysiciens avaient déjà imaginé que le mécanisme de réduction de la taille des grains devait jouer un rôle important dans la formation des plaques, car on l'observe au niveau de toutes les grandes failles, qui marquent la frontière entre deux plaques,* précise-t-elle. *Mais jusqu'à présent, personne n'en avait fait une description mathématique suffisamment proche de la réalité, avant de l'intégrer dans un modèle global de la lithosphère. C'est ce qui fait le succès de ce nouveau modèle.* »

Car contrairement aux modèles « classiques », qui partant d'une plaque unique n'aboutissent pas à sa fragmentation, le modèle de Yanick Ricard et David Bercovici y est parvenu. « *Il montre que ce sont principalement les courants de matière descendant à l'intérieur du manteau qui, en étirant peu à peu les roches de la lithosphère, les ont fragilisées,* confie Yanick Ricard. *Davantage que la pression exercée par les courants ascendants.* » Là où ces tensions s'exercent, il faut une dizaine de millions d'années pour fragiliser la lithosphère sur toute son épaisseur. Puis, les courants de matière se déplaçant dans le manteau au cours du temps, de nouvelles zones de faiblesse se forment peu à peu. « *Elles se sont multipliées pendant un milliard d'années le long de grandes lignes qui, en se fracturant, sont devenues les frontières des plaques* », conclut le chercheur.

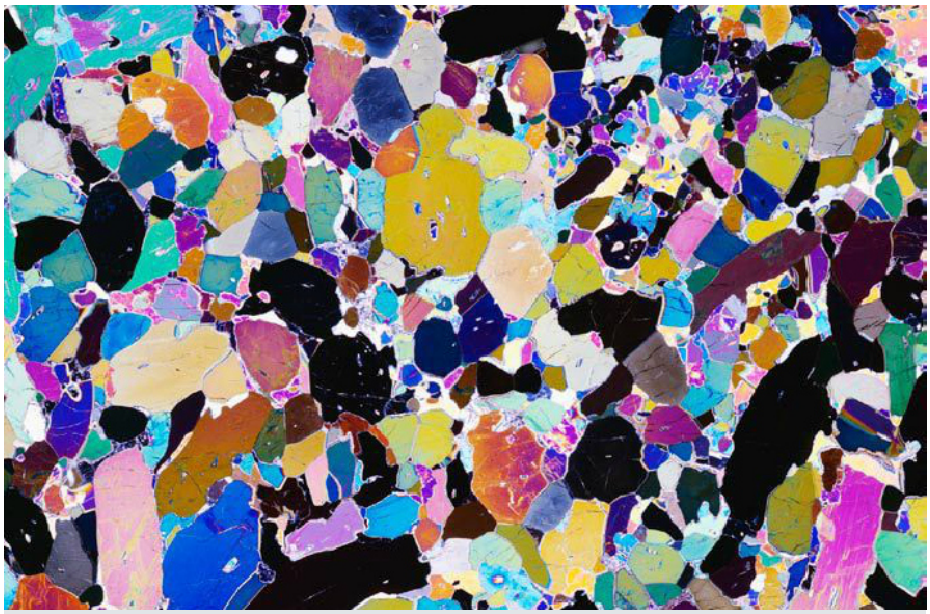
Zones localisées. « *Il s'agit d'une avancée majeure,* juge également Éric Calais, de l'École normale supérieure de Paris. *Jusqu'ici, les géophysiciens avaient du mal à comprendre pourquoi les frontières de plaque forment des régions aussi étroites, larges d'une dizaine de kilomètres seulement dans certains cas. Avec ce nouveau scénario, qui montre que les roches se fragilisent dans des zones extrêmement localisées, on peut enfin expliquer ce qu'on observe sur le terrain.* »

En théorie pourtant, les régions fragilisées auraient pu cicatriser avant d'être connectées les unes aux autres. En effet, lorsque les mouvements de convection cessent à un endroit donné, les cristaux de la lithosphère peuvent regrossir. Pourquoi ce scénario ne s'est-il pas produit ? Selon les deux chercheurs, >>>

L'essentiel

- **LA FRAGMENTATION** de l'enveloppe terrestre rigide en plusieurs plaques n'avait jusqu'à présent jamais été modélisée.
- **LE MODÈLE** proposé par deux géophysiciens y parvient, en simulant les phénomènes qui se produisent à l'échelle microscopique dans la roche.
- **DES ZONES DE FAIBLESSE** se sont multipliées pendant un milliard d'années le long de grandes lignes qui, en se fracturant, sont devenues les frontières des plaques.

Les premières fractures de l'écorce terrestre



© DIRK WIERSMA/SPL/COSMOS

Ces taches de couleurs correspondent aux grains d'olivine et de pyroxène qui constituent, pour l'essentiel, la péridotite, principale roche du manteau. Ils sont ici vus au microscope polarisant. Leur taille, de l'ordre du millimètre, change en fonction des tensions exercées sur la roche.

>>> deux facteurs peuvent l'expliquer. D'une part, la température de la lithosphère il y a 4 milliards d'années était insuffisante pour favoriser une croissance rapide des cristaux. D'autre part, dans ce contexte, la présence d'olivine freinait la cristallisation du pyroxène, et inversement. Pour que la cicatrisation se produise dans ces conditions, il aurait fallu un milliard d'années environ. Or, selon le calcul des deux géophysiciens, les zones de faiblesse étaient alors déjà toutes formées. Elles ont donc pu se connecter et se fracturer, délimitant alors les frontières des plaques.

Vénus trop chaude. En ce sens, la situation sur Terre était bien différente de celle sur Vénus, ce qui explique pourquoi cette dernière, pourtant proche de la Terre par sa taille, sa masse et sa composition, est dépourvue de tectonique des plaques. Chauffée par un effet de serre intense, sa surface atteint 460 °C : à ces températures extrêmes, sa croûte peut se réparer beaucoup plus vite que sur Terre – en 10 millions d'années environ –, l'empêchant ainsi de se fracturer en plaques.

Malgré cette avancée importante, bien des questions demeurent. « *Ce nouveau modèle est certes en parfait accord avec les observations de terrain et les résultats obtenus en laboratoire sur la résistance des roches de la croûte terrestre, mais il reste quelque peu simplifié,* commente Paul Tackley, de l'École polytechnique fédérale de Zürich, en Suisse. *Par exemple, les auteurs ne prennent pas véritablement en compte le fait qu'il y a 4 milliards d'années, l'intérieur de notre planète était en effet plus chaud qu'aujourd'hui et produisait bien plus de magma en surface. La croûte était donc plus épaisse et du coup, moins sensible aux mouvements de convection dans le manteau.* » Selon Éric Calais, une autre limite de ce modèle est qu'il ne reproduit pas ces mouvements : « *On se contente d'imposer les endroits où ils se produisent et créent les zones de faiblesse.* »

Yanick Ricard et David Bercovici tentent actuellement de corriger ce défaut. « *Notre modèle prendra bientôt en compte ces déplacements de manière à mieux prévoir l'endroit où les frontières sont apparues puis comment elles ont évolué,* avance Yanick Ricard. *Avec l'espoir de recréer autant de plaques qu'on en observe actuellement, et ce, avec les bonnes formes géométriques et les bonnes vitesses de déplacement.* » Alors, et alors seulement, on pourra aussi comprendre comment le puzzle s'est modifié au cours des temps géologiques. ■

Un puzzle géant

On compte une douzaine de plaques tectoniques principales à la surface de notre planète, dont sept d'entre elles (plaques pacifique, eurasienne, africaine, antarctique, indo-australienne, nord-américaine et sud-américaine) occupent plus de 80 % de la superficie terrestre. Entraînées par la convection du manteau sous-jacent, les plaques se déplacent de quelques centimètres par an. Elles peuvent soit glisser l'une contre l'autre, créant au passage d'intenses séismes, comme au niveau de la faille de San Andreas aux États-Unis. Soit entrer en collision frontale : c'est ce phénomène qui est à l'origine de la création des chaînes de montagnes comme les Alpes ou l'Himalaya. Ou encore plonger l'une sous l'autre – on parle de subduction – et s'enfoncer dans le manteau, donnant naissance à un arc volcanique en surface – l'archipel japonais par exemple. Ou enfin s'écarter, comme au niveau de la dorsale médio-atlantique, où de la matière du manteau remonte à la surface.

[1] D. Bercovici et Y. Ricard, *Nature,* doi:10.1038/nature13072, 2014.

Pour en savoir plus

> J.-O. Baruch, « La victoire de la tectonique des plaques », *La Recherche,* mai 2010, p. 44.

> É. Kaminski, « Les retournements du manteau », *La Recherche,* février 2009, p. 56.

> F. Lemarchand, P. Tapponnier et É. Kaminski, « La tectonique des plaques », *La Recherche, Hors-Série* « Les sciences de la Terre en 18 mots-clés », septembre 2007, p. 6.

> F. Lemarchand et É. Kaminski, « Le manteau terrestre », *La Recherche, Hors-Série* « Les sciences de la Terre en 18 mots-clés », septembre 2007, p. 18.

EN VENTE CHEZ VOTRE MARCHAND DE JOURNAUX

Neurologie

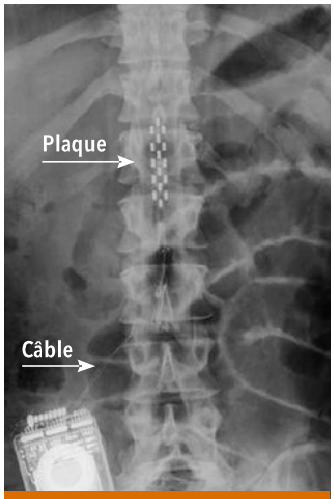
Des paraplégiques bougent volontairement leurs jambes

Un dispositif de stimulation électrique implanté contre la moelle épinière a permis à quatre paraplégiques de retrouver un usage, encore très partiel, de leurs jambes.

« *Lève la jambe gauche !* » Impossible : la jambe de Kent Stephenson reste totalement immobile, privée de tout mouvement volontaire. Comme elle l'est depuis quatre ans. À l'époque, un accident de moto a provoqué une lésion de sa moelle épinière, entraînant une paralysie de la poitrine aux orteils. Le médecin réitère sa demande : « *Lève la jambe gauche !* » Cette fois, Kent met en marche un stimulateur avec une télécommande. Et l'incroyable se produit : il lève sa jambe gauche. Pour quelqu'un qui n'a plus réussi à bouger ses jambes depuis quatre ans, c'est une impression merveilleuse. Comme si son corps reprenait vie.

Kent Stephenson est l'un des quatre paraplégiques qui viennent d'expérimenter avec succès une technique de stimulation électrique de la moelle épinière [1]. « *Ce qui est vraiment étonnant, c'est qu'ils ont recouvré un contrôle spécifique précis et volontaire de leurs membres inférieurs. Ils parviennent à bouger pieds, chevilles et genoux sur demande, même s'ils sont encore loin de pouvoir marcher* », commente Grégoire Courtine, spécialiste de neuroréhabilitation à l'École polytechnique fédérale de Lausanne, en Suisse. Ce travail expérimental a été réalisé par une équipe américaine de l'université de Louisville, dans le Kentucky, et de l'université de Californie à Los Angeles. La technique consiste à poser une plaque pourvue de seize électrodes contre la première vertèbre lombaire et à l'alimenter en continu au moyen d'une batterie grosse comme une boîte d'allumettes implantée sous la peau. Le site choisi pour la stimulation abrite sur une longueur de 7 centimètres les circuits neuronaux de la moelle épinière qui contrôlent les mouvements des jambes. En les stimulant, on réveille leur capacité à transformer les commandes du cortex moteur en un mouvement spécifique des membres inférieurs. Mais comment, alors que toute communication avec le cerveau semble impossible ?

Il y a deux ans, avec l'un des quatre paraplégiques, Rob Summers, la même équipe avait obtenu un résultat identique ou presque. L'accident avait laissé à ce patient un reste de communication sensorielle (sensation de chaleur, toucher) entre le cerveau et les membres inférieurs. On pensait alors que c'était ce résidu sensoriel qui permettait à la stimulation électrique de



UNE PLAQUE pourvue de seize électrodes est implantée contre la première vertèbre lombaire, dans une zone où se trouvent les circuits neuronaux qui contrôlent les mouvements des jambes. Elle est reliée par un câble à une batterie rechargeable (en bas à gauche) placée sous la peau, à hauteur de l'abdomen.

KENT STEPHENSON, devenu paraplégique à la suite d'un accident de moto, suit une séance d'entraînement : pendant qu'il tente de bouger sa jambe sur commande, le médecin mesure le niveau d'activité résiduel de ses muscles, par électromyogramme. © PHOTOS : COURTESY OF THE UNIVERSITY OF LOUISVILLE

rétablir le lien entre les neurones de la moelle épinière et ceux du cortex moteur. Cette idée s'est révélée fausse : parmi les trois nouveaux paraplégiques de la récente étude, deux n'avaient plus de communication sensorielle ; pourtant la stimulation électrique de la moelle épinière a fonctionné aussi chez eux. Et même dès qu'on leur a posé l'appareil, sans passer par les longues séances de préparation physique que l'on avait fait suivre à Rob Summers.

Axones préservés. L'hypothèse, aujourd'hui, est la suivante. Dans 99 % des cas de paraplégie, il reste dans la moelle épinière quelques axones venant du cerveau qui ne sont pas détruits, mais qui ne parviennent pas à transmettre les commandes motrices volontaires aux neurones endormis de la moelle épinière. Lorsqu'on stimule électriquement ces derniers, c'est comme si on redémarrait un moteur. Ils peuvent à nouveau traiter le signal, même faible, venant du cerveau et le transformer en un mouvement des jambes. Pour Grégoire Courtine, cette expérience n'est qu'un début, ne serait-ce que parce que le stimulateur employé, très simple, n'a pas été conçu pour une telle application.
Il annonce d'ailleurs que son équipe met au point « *une technologie plus flexible qui permettra de stimuler plusieurs sites en même temps avec des intensités variables, donc de susciter des mouvements plus élaborés* ». Voire un jour, qui sait, de remarcher ? ■

Marie-Laure Théodule

[1] C.A. Angeli *et al.*, *Brain*, doi:10.1093/brain/awu038, 2014.

→ Bref

→ ASTRONOMIE

Astéroïde couronné

Les planètes géantes Saturne, Uranus et Neptune ne sont pas seules à posséder des anneaux. L'astéroïde Chariklo, glaçon de 250 kilomètres de diamètre qui se déplace à leur voisinage, en possède deux. Leurs rayons sont respectivement de 391 et 205 kilomètres, pour des largeurs de 7 et 3 kilomètres.

E. Braga-Ribas *et al.*, *Nature, 508*, 72, 2014.

→ ÉTHOLOGIE

Anciens primates sociaux

Des groupes de chimpanzés, en Ouganda, existeraient depuis des siècles (2 600 ans pour le plus ancien). Tous les mâles d'un groupe étant apparentés, des généticiens ont obtenu l'âge de leur plus récent ancêtre commun mâle, donc l'âge du groupe, en étudiant leur chromosome Y.

K. Langergraber *et al.*, *J. Hum. Evol., 69*, 1, 2014.

→ CLIMAT

Imprévisible El Niño

L'intensité des épisodes El Niño, réchauffements du Pacifique Sud qui influent sur le climat de la planète, varie d'une décennie à l'autre. Mais, les modèles ne permettent pas de prévoir ces variations, affirme une équipe américaine. Impossible donc de s'y préparer.

A.T. Wittenberg *et al.*, *J. Climate, 27*, 2667, 2014.

Indicateur

2 992 mètres de profondeur : c'est le nouveau record de plongée d'un mammifère, atteint par une baleine à bec de Cuvier, au large de la Californie. Ce faisant, elle a passé 2 h 17 en apnée.

G. S. Schorr *et al.*, *PLoS One*, 9(3):e92633, 2014.

CE BASSIN DES THERMES PRIVÉS du « Triclinos », une des plus grosses constructions d'Apamée en Syrie au V^e siècle, était alimenté par les aqueducs de la cité.
© MICHAEL VANNESSE / DÉP. D'HISTOIRE, UNIV. DE LA MARTINIQUE

Archéologie

Aqueducs préservés à l'époque byzantine

Au IV^e siècle avant notre ère, les Romains ont construit les premiers aqueducs destinés à acheminer l'eau dans leurs cités. Celles de l'Empire romain d'Orient les avaient, pensait-on, abandonnés au début de l'époque byzantine, aux V^e et VI^e siècles de notre ère. Or, l'étude d'installations hydrauliques construites à cette époque à Apamée, en Syrie, révèle qu'ils étaient alimentés en eau par un aqueduc interne à la ville [1].
Dans les années 1980, des fouilles avaient dégagé à Apamée des citernes accolées aux murs de villas byzantines. Les archéologues avaient supposé qu'elles servaient à recueillir l'eau de pluie. Mais en 2010, l'équipe de Didier Viviers, de l'université libre de Bruxelles, a découvert, dans trois villas, des bassins reliés à ces citernes par des canalisations. Dans deux villas, ces bassins formaient des fontaines d'agrément, et dans la troisième il alimentait des thermes privés. L'eau ne provenait probablement pas des pluies : « *Compte tenu des précipitations à Apamée, nous avons calculé que ces systèmes n'auraient pu être utilisés que de façon irrégulière et pendant un temps très court lorsqu'il ne pleuvait pas,* explique Benoît Haut, également à l'université libre de Bruxelles. *Or, ils étaient certainement conçus pour fonctionner au moins lorsque le maître de maison le souhaitait, le temps d'une réception par exemple.* » Seule solution : les fontaines et les thermes étaient alimentés en eau courante par l'aqueduc interne d'Apamée, encore opérationnel. ■ **Jacques Abadie**

[1] M. Vannesse *et al.*, *J. Archaeol. Sci., 46*, 245, 2014.

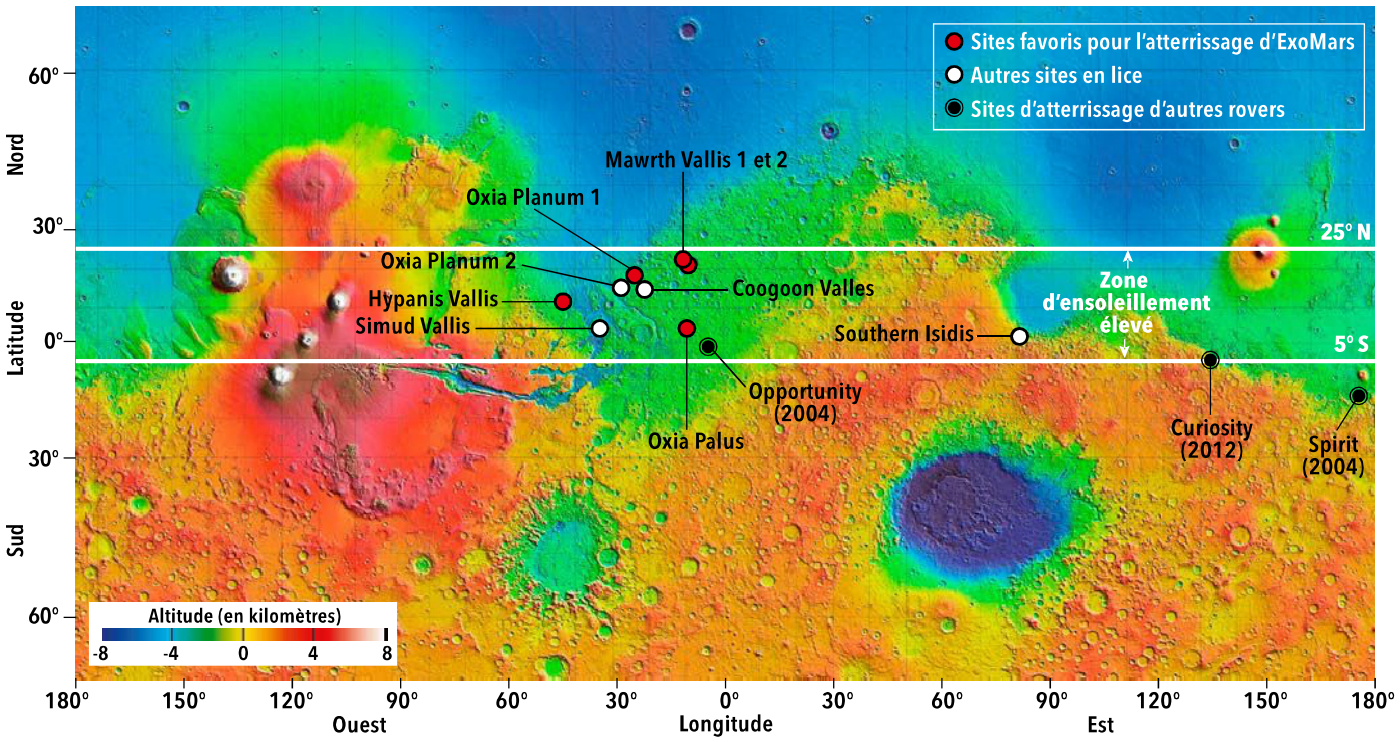
Écologie Guerre chimique chez les fourmis

Arrivée aux États-Unis dans les années 1930, la fourmi de feu sud-américaine *Solenopsis invicta* y a en grande partie supplanté les variétés autochtones : très agressive, elle tue ses victimes en les aspergeant de venin. Pourtant, cette fourmi redoutable est aujourd'hui menacée par une congénère, la fourmi folle *Nylanderia fulva,* arrivée d'Amérique du Sud au début des années 2000. Comment est-ce possible ? Des entomologistes de l'université du Texas viennent de le découvrir, en observant leur comportement en laboratoire [1]. Lorsqu'elles sont aspergées du venin de leur agresseuse, les fourmis folles s'enduisent d'acide formique, produit par une glande située au niveau de l'abdomen. Cet acide agit alors comme un détoxifiant. On ignore le mécanisme mis en œuvre, mais chez des spécimens privés de ce recours, le taux de survie chute de 98 % à 48 %. *« C'est la première fois qu'on observe ce mode de défense »,* commente Laurent Keller, de l'université de Lausanne. Cela peut surprendre, étant donné que plusieurs espèces de fourmis produisent de l'acide formique. Selon les auteurs, ce comportement résulterait de la coévolution des deux espèces sur leur territoire d'origine, en Amérique du Sud. Aujourd'hui, il confère à la fourmi folle un net avantage sur sa rivale aux États-Unis. Et comme elle compte cent fois plus d'ouvrières par colonie que les variétés locales, elle a tout pour elle. Du moins, jusqu'à l'arrivée d'une prochaine espèce invasive ? ■ **Pierre Martin**

LORS D'UN COMBAT, une grosse fourmi de feu asperge une fourmi folle du venin qui jaillit de son dard (à gauche). Sa victime s'en préserve alors en s'enduisant d'acide formique, qui détoxifie le venin (à droite). © LAWRENCE GILBERT, COURTESY OF SCIENCE/AAAS & UNIV. OF TEXAS AT AUSTIN

[1] E.G. LeBrun *et al., Science, 343,* 1014, 2014.

Planétologie Quel site d'atterrissage pour le rover ExoMars ?



L'AGENCE SPATIALE EUROPÉENNE déterminera courant juin une liste de 3 ou 4 sites potentiels pour l'atterrissage de son rover ExoMars, prévu en 2019. Les 9 sites en lice (points blancs et rouges) sont situés entre 2,1 et 3,98 kilomètres au-dessous de la référence topographique de Mars, dans des zones pas trop poussiéreuses ; leur latitude est comprise entre 25° nord et 5° sud, là où l'ensoleillement est élevé. Lors d'un vote informel ayant eu lieu fin mars, 5 sites se sont distingués (points rouges) : ceux dont plusieurs éléments minéralogiques ou morphologiques laissent penser qu'ils renfermaient de l'eau il y a plusieurs milliards d'années. © MOLA SCIENCE TEAM. Texte : Vincent Glavieux. Source : NASA et ESA

→ Bref

→ ANTHROPOLOGIE

Gènes de Neandertal

On connaît, depuis peu, le génome de Neandertal. Une équipe internationale a maintenant reconstitué les différences entre l'expression des gènes dans les cellules osseuses de celui-ci et dans les nôtres. Elles expliqueraient en particulier que les morphologies de nos membres ne soient pas identiques.

D. Gokhman *et al.*, *Science*, 10.1126/science.1250368, 2014.

→ PHYSIQUE

4 quarks unis

La collaboration internationale LHCb, installée au CERN, à Genève, a découvert un nouvel exemple de matière exotique : la particule Zc(4430), constituée de 4 quarks, des constituants élémentaires de la matière. D'ordinaire, les particules en contiennent au maximum 3.

Collaboration LHCb, arXiv:1404.1903, 2014.

→ BIODIVERSITÉ

Chimpanzés du Libéria

Les guerres civiles qui ont ravagé le Libéria depuis 1989 n'ont pas affecté ses populations de chimpanzés sauvages. D'après un recensement conduit de 2010 à 2012, le pays en abrite 7 000. Soit la deuxième plus grande population de cet animal en Afrique de l'Ouest, après la Guinée.

C.G. Tweh *et al.*, *Oryx*, doi:10.1017/S0030605313001191, 2014.

Psychiatrie

« Les essais cliniques ne viseront plus uniquement les symptômes »

Marion Leboyer dirige la fondation FondaMental pour le soutien à la recherche en psychiatrie en France. © DR

L'Institut américain de la santé mentale (NIMH) modifie ses critères de financement d'essais cliniques [1]. Quel est le principal changement ?

M.L. Pour être éligibles à un financement public par le NIMH, les essais cliniques ne devront plus uniquement étudier l'effet d'un traitement sur des symptômes. Désormais, ils devront aussi clairement indiquer la cible thérapeutique précise visée par le traitement qu'ils prévoient d'évaluer, et mesurer l'effet obtenu sur cette cible. Reflétant un mécanisme sous-jacent suspecté dans le trouble psychiatrique concerné, les cibles peuvent être très diverses : activité d'un récepteur moléculaire, d'une enzyme, d'un réseau neuronal, une cible cognitive, etc.

Pourquoi cette décision ?

M.L. Aujourd'hui, il n'y a plus de nouveaux médicaments en développement. Pour Thomas Insel, directeur du NIMH, cette désertion de l'industrie pharmaceutique est due à un manque de cibles thérapeutiques tangibles sur lesquelles orienter les recherches de thérapeutiques nouvelles et plus efficaces. Avec ce nouveau système, l'idée est aussi que même un essai qui n'améliore aucun symptôme fasse quand même avancer les connaissances sur la pathologie concernée. Il vise également à valider scientifiquement de nombreuses thérapies non médicamenteuses qui se sont développées ces dernières années ; une condition *sine qua non* pour que les systèmes de santé acceptent de les rembourser.

N'y a-t-il pas aussi une raison économique ?

M.L. Thomas Insel indique clairement que ces nouveaux critères vont réduire le nombre d'essais éligibles au financement du NIMH, l'idée étant de faire « mieux avec moins » dans un contexte budgétaire de plus en plus serré. En 2013, le NIMH a dépensé près de 100 millions de dollars pour le financement d'essais cliniques : plus de la moitié de ces essais ne répondaient pas à ces nouveaux critères. Mais il souhaite surtout réduire le gaspillage d'argent dans des essais qui n'apportent aucun enseignement sur les mécanismes sous-jacents de la pathologie concernée.

Que pensez-vous de cette démarche ?

M.L. Elle va dans le bon sens car, en psychiatrie, il nous faut plus d'indicateurs d'efficacité et nous avons surtout un besoin crucial d'innovation thérapeutique. En effet, il y a urgence : dans les pays développés, le nombre de malades ne cesse de croître. Désormais, une personne sur quatre souffre d'un trouble mental au cours de sa vie. Et les maladies psychiatriques constitueront la première cause de handicap dans les pays développés à l'horizon 2020 ; rien qu'en France, elles sont déjà à l'origine de 12 000 suicides par an.

Justement, de tels critères sont-ils transposables en France ?

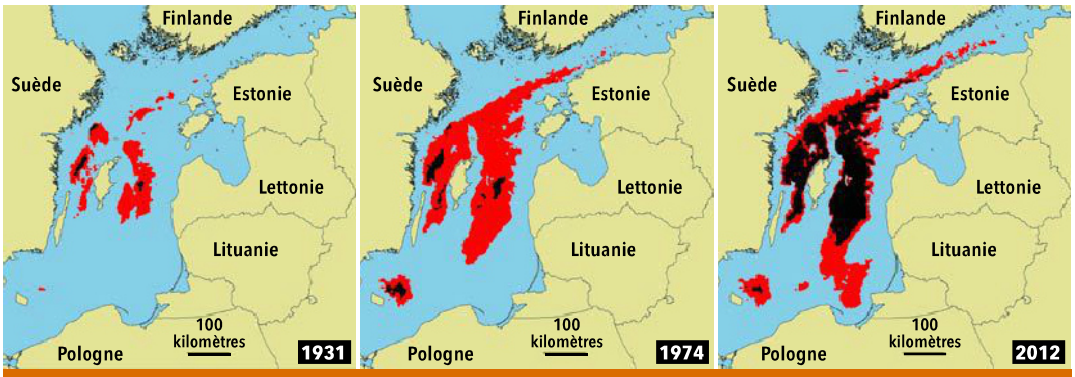
M.L. Nous sommes bien loin de discuter l'impact éventuel de cette orientation du NIMH, ni même des critères de financement public des essais cliniques en psychiatrie : il y en a si peu ! En outre, nous n'avons ni institut équivalent au NIMH ni même de fonds publics réservés à la recherche en psychiatrie. Bref, on manque de soutien des pouvoirs publics sur ce sujet. C'est une erreur, car les maladies mentales, outre les souffrances qu'elles entraînent, coûtent une fortune à la société. ■

Propos recueillis par Jean-Philippe Braly

[1] http://tinyurl.com/m6w9nze

Environnement La mer Baltique étouffe de plus en plus

La Baltique, future mer morte ? Lorsque l'eau a une concentration d'oxygène dissous inférieure à 2 milligrammes par litre, la vie n'y est presque plus possible. Or, en un siècle, les zones sous-oxygénées ont été multipliées par dix en mer Baltique, selon Jacob Carstensen, de l'université d'Aarhus, au Danemark, et des confrères suédois [1].
Ce constat alarmant découle de l'analyse des données de salinité, de température et d'oxygénation recueillies entre 1898 et 2012 dans deux grands bassins situés autour de l'île de Gotland, entre la Suède et la Lettonie.
Plus précisément, les zones sous-oxygénées de la Baltique, qui en 1898 ne s'étendaient que sur 5 000 kilomètres carrés, en occupent aujourd'hui plus de 60 000, sur une superficie totale d'environ 400 000 kilomètres carrés. En outre, alors qu'elles n'étaient présentes qu'au fond des bassins, ces eaux se rapprochent de la surface : elles se situent maintenant à quelque 50 mètres de profondeur seulement. Les conséquences sur l'écosystème se font sentir, de vastes zones étant dépeuplées.
Mais Jacob Carstensen et ses collaborateurs ne se sont pas contentés de décrire cette évolution néfaste. Ils ont aussi modélisé les mécanismes physiques et biologiques à l'origine de cette désoxygénation, afin de comparer leur influence respective.



LES ZONES SOUS-OXYGÉNÉES (en rouge) et celles complètement dépourvues d'oxygène (en noir) s'étendent en mer Baltique depuis un siècle. On visualise ici cette expansion entre 1931 et 2012, à intervalles d'environ quarante ans. Source : Maps Produced as Part of the Bonus Hyper and Helcom Targrev Projects. J. Carstensen *et al.*, *PNAS*, 2014.

Eaux peu ventilées. Du côté des paramètres physiques, figure le fait que la Baltique, peu profonde, enserrée par la péninsule scandinave, ne profite pas des courants océaniques qui permettraient de ventiler ses eaux. L'oxygénation ne peut se faire qu'en surface par échanges air-mer. Or, le réchauffement climatique en cours depuis plusieurs années ralentit ce processus, car plus l'air est chaud, moins l'oxygène se dissout dans l'eau.
Du côté des paramètres biologiques figure la

Prix Abel La physique-mathématique à l'honneur

Le prix Abel est attribué cette année au Russe Yakov Sinaï, né en 1935, qui travaille entre l'université de Princeton, aux États-Unis, et l'Institut Landau de physique théorique, à Moscou, en Russie [1]. Cette récompense illustre la reconnaissance croissante dont bénéficie une discipline longtemps mal considérée : la physique-mathématique.
L'un des apports principaux de Yakov Sinaï concerne en effet l'« ergodicité des gaz » : le fait que l'état d'un gaz qu'on laisse évoluer suffisamment longtemps ne dépend pas de son état de départ. De façon plus générale, un système ergodique perd la mémoire de sa condition initiale. Mathématiquement, cela revient à remplacer les moyennes temporelles par des moyennes d'ensemble.
L'hypothèse ergodique est fondamentale en physique, car elle permet de décrire de manière statistique un système. Autrement dit, sans hypothèse ergodique, pas de mécanique statistique. Cette hypothèse qui était le plus souvent implicite est aujourd'hui justifiée pour une large gamme de systèmes, qu'il s'agisse de gaz ou de fluides. Les résultats de ce domaine encore actif découlent des premières idées mises en place par Yakov Sinaï à partir des années 1960.
En outre, non content de dresser des ponts entre les systèmes dynamiques, la théorie ergodique et la mécanique statistique, Yakov Sinaï a aussi beaucoup œuvré pour l'organisation de la communauté de la physique-mathématique à travers le monde. ■

© PRINCETON UNIVERSITY, DEPARTMENT OF MATHEMATICS

YAKOV SINAÏ a reçu, le 20 mai à Oslo, le prix Abel décerné par l'Académie norvégienne des sciences et des lettres.

Philippe Pajot

[1] http://bit.ly/Abel2014

prolifération excessive d'organismes grands consommateurs d'oxygène. Une prolifération due à l'apport massif d'azote et de phosphore par les eaux des fleuves et rivières des pays limitrophes, conséquence de diverses activités humaines, dont l'agriculture intensive. *« Comme pour la mer Noire, le poids de l'activité humaine est indéniable sur la Baltique »*, reconnaît Aurélien Paulmier, biogéochimiste marin à l'Institut de recherche pour le développement.

Pollution coupable. Mais les auteurs de l'article, eux, vont plus loin : ils considèrent que dans le contexte nordique, c'est le principal responsable de la progression des zones non oxygénées. Par conséquent, pour sauver la Baltique, il est à leurs yeux illusoire de compter sur un coup de pouce de la météo, tel que celui ayant provoqué la régression des zones sous-oxygénées entre 1983 et 1992. Durant cette décennie, en effet, d'abondantes précipitations avaient permis de diluer les effets de la pollution. Mais aujourd'hui, la situation est telle, que la seule solution serait de prendre des mesures drastiques pour limiter, en amont, la pollution. ■

Mathias Germain

[1] J. Carstensen *et al.*, *PNAS*, *111*, 5628, 2014.

➜ Bref

➜ BIOLOGIE

Amibe carnivore

Contrairement à ce que l'on pensait, l'amibe *Entamoeba histolytica*, parasite responsable d'une maladie diarrhéique redoutable, ne tue pas les cellules humaines avec une toxine avant de les ingérer. Elle les grignote vivantes, jusqu'à ce qu'elles meurent.

K. S. Ralston *et al.*, *Nature*, doi:10.1038/nature13242, 2014.

➜ ASTROPHYSIQUE

Lac liquide au sud d'Encelade

Selon une récente analyse des mesures du champ gravitationnel d'Encelade effectuées par la sonde Cassini, le pôle Sud de cette lune de Saturne pourrait bien abriter un océan d'eau liquide. Il serait situé à 30 kilomètres sous la surface glacée, et s'étendrait du pôle jusqu'à 50 degrés de latitude.

L. Iess *et al.*, *Science*, *344*, 78, 2014.

➜ ÉCOLOGIE

Faons fragilisés

Un suivi au long cours mené en Champagne le montre : la date de mise bas des femelles de chevreuil n'a pas changé en vingt-sept ans, alors que la végétation printanière émerge plus tôt. Résultat : les mères ont du mal à nourrir leurs petits, dont le taux de survie diminue.

F. Plard *et al.*, *PLoS Biol.*, 12(4):e1001828, 2014.

© W. ROLFES/ARCO/AGE

Neurosciences Un atlas neuronal des comportements

Ce sont 37780 larves de drosophiles qui bouleversent l'analyse neuronale des comportements. En étudiant ces petites bêtes, Carey Priebe, Marta Zlatic et leurs collaborateurs de l'université Johns Hopkins, à Baltimore, et du campus de recherche Janelia Farm, en Virginie, ont établi un atlas associant de façon probabiliste l'activation d'un réseau de neurones donné et le déclenchement de tel ou tel comportement locomoteur [1]. Qu'ont donc fait ces biologistes ? Les 37780 larves appartiennent à 1054 lignées transgéniques, chez lesquelles on peut activer un réseau spécifique de 2 à 15 neurones, différents selon la lignée. Chaque larve a été stimulée et filmée pendant 30 secondes, puis les vidéos ont été passées au crible d'un traitement algorithmique destiné à repérer les comportements adoptés par les animaux – fuite, virage, reculade, etc. Il en est ressorti 29 séquences comportementales détaillées. Les scientifiques ont ensuite effectué une analyse statistique croisée de l'ensemble des données comportementales des 37780 larves et des réseaux neuronaux activés chez chacune d'elles. *« Ils ont alors constaté que l'activation d'un réseau donné ne détermine pas un comportement unique : elle favorise une famille de comportements,* explique Pierre-Marie Lledo, de l'Institut Pasteur, à Paris. *Il y aura un avant et un après ce papier, Car en recourant aux outils de la physique statistique pour analyser une grande quantité de données, on accède à une vision probabiliste des comportements, là où jusqu'à présent on devait se contenter d'une vision déterministe. »* ■

Cécile Klingler

[1] J.T. Vogelstein *et al.*, *Science, 344,* 386, 2014.

Planétologie Messenger affine Mercure

Plus petite planète du système solaire avec ses 4879 kilomètres de diamètre, Mercure aurait perdu entre 10 et 14 kilomètres de diamètre depuis que sa croûte s'est solidifiée, il y a 4 milliards d'années [1]. Et non 1,6 à 6 kilomètres, comme l'indiquaient les précédentes estimations.

L'équipe menée par Paul Byrne, de la Carnegie Institution à Washington, aux États-Unis, est parvenue à ce résultat en analysant les cartes de la surface de Mercure fournies par la sonde américaine Messenger qui orbite autour de Mercure depuis 2011. Le principe d'analyse est le suivant. Mercure présente de nombreuses crêtes et failles visibles sur ces cartes. Une seule plaque constituant sa croûte, il est impossible que ces « rides » résultent de mouvements tectoniques comme sur Terre. Seule une contraction a pu les engendrer. L'analyse des dimensions des crêtes et des failles permet d'évaluer l'ampleur de cette dernière. Les différences entre ces évaluations et les précédentes s'expliquent parce que Messenger a analysé l'intégralité de la surface de Mercure, alors que Mariner 10, sonde qui avait fourni les précédentes observations, n'en avait examiné que 45 %. Ensuite, parce que les données de Messenger sont plus précises : les planétologues ont pris en compte dans leurs calculs 5934 crêtes, mesurant de 9 à 900 kilomètres de long, et jusqu'à 3 kilomètres de hauteur. Au final, le résultat obtenu réconcilie « expérimentateurs » et modélisateurs. *« Grâce à cette précision,* salue Alain Doressoundiram, de l'Observatoire de Paris, *les mesures de la contraction de Mercure sont désormais en accord avec les valeurs fournies par les modèles d'évolution de cette planète. »* ■ **Camille L'Épine**

[1] P. K. Byrne *et al.*, *Nat. Geosci., 7,* 301, 2014.

→ Bref

→ MÉDECINE
Un espoir dans la maladie de Friedreich

Une équipe française a guéri des souris souffrant d'une grave dégénérescence cardiaque semblable à celle provoquée chez l'homme par la maladie de Friedreich, maladie génétique héréditaire. Elle y est parvenue en leur injectant le gène codant la protéine, nommée frataxine, dont l'absence provoque la maladie.

M. Perdomini *et al.*, *Nat. Med.*, doi:10.1038/nm.3510, 2014.

→ ÉCONOMIE
Traitement inégal

La recherche néglige les maladies des pays pauvres. L'analyse de 4 millions d'articles scientifiques biomédicaux le prouve : une écrasante majorité concerne les maladies des pays riches, comme le cancer. Les maladies infectieuses, comme le paludisme, sont sous-représentées.

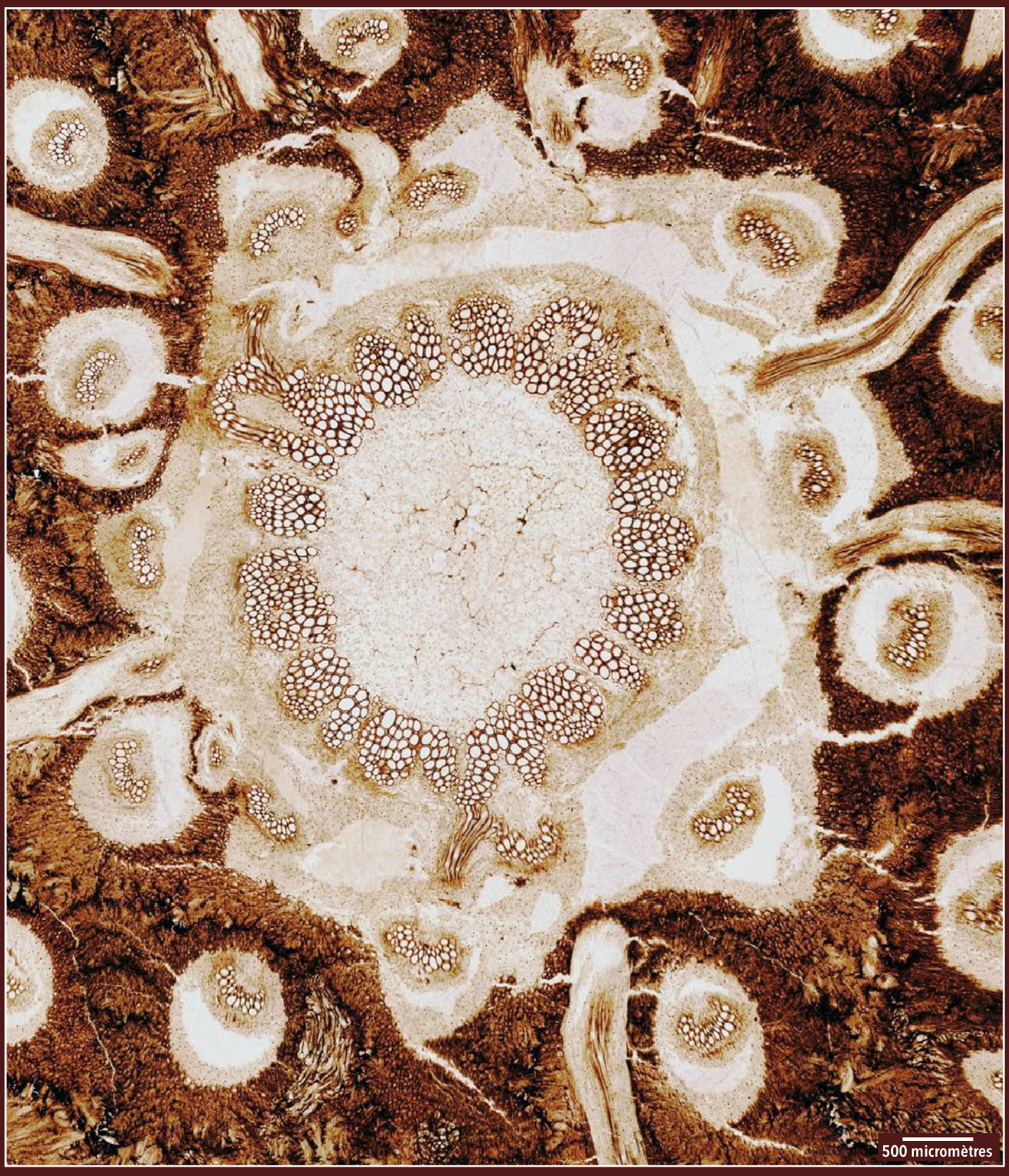
J. A. Evans *et al.*, *PLoS One, 9*(4):e90147, 2014.

→ PHYSIQUE
L'esquive de la mouche

Pour éviter le danger, la mouche effectue très rapidement des virages à 90°. Elle exécute, tel un avion de chasse, une rotation horizontale sur elle-même avant de dévier de sa trajectoire initiale dans un mouvement latéral.

F. T. Muijres *et al.*, *Science, 344,* 172, 2014.

© FLORIAN MUIJRES



© BENJAMIN BOMFLEUR/SWEDISH MUSEUM OF NATURAL HISTORY

Paléontologie Fougère endormie

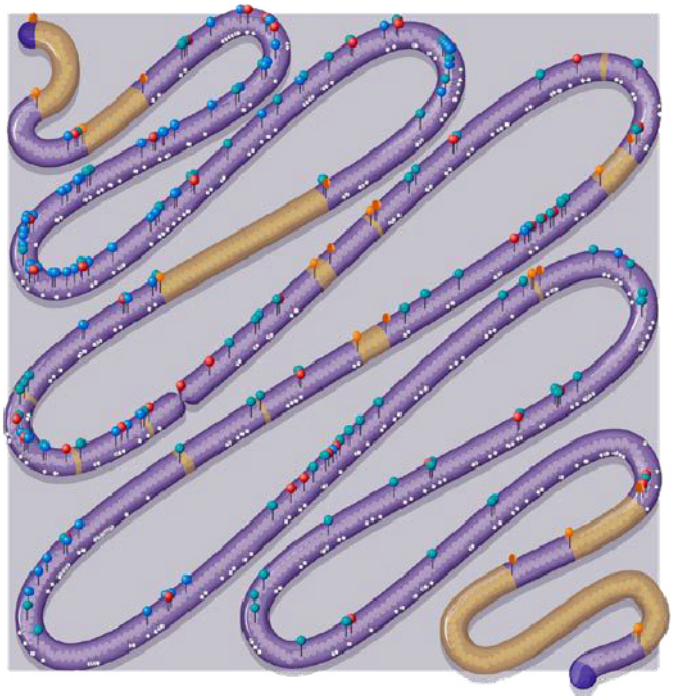
Qui croirait que cette racine de fougère royale, découverte à Korsaröd, en Suède, a 180 millions d'années ? Au centre de cette coupe transversale observée au microscope optique, on distingue nettement les cellules de la moelle, entourées par les vaisseaux conducteurs de sève. Le fossile est si bien préservé qu'à plus fort grossissement, les biologistes ont visualisé le noyau des cellules et leurs chromosomes. La structure cellulaire présente de telles similitudes avec celle des fougères royales actuelles, qu'il semble que cette plante n'ait quasiment pas évolué depuis le Jurassique.

B. Bomfleur *et al.*, *Science, 343*, 1376, 2014.

Biologie Premier chromosome synthétique d'une cellule complexe

Une équipe internationale a réussi à synthétiser l'un des seize chromosomes de la levure de boulanger, *Saccharomyces cerevisiae*, et à l'insérer dans une levure vivante sans perturber son fonctionnement [1]. Il s'agit d'une étape symbolique importante pour la biologie de synthèse lire « La biologie de synthèse a besoin de la sociologie », p. 78). Jusqu'à présent, on était « seulement » parvenu à synthétiser un génome bactérien : en 2010, l'équipe du biologiste américain Craig Venter avait reconstitué le génome de la bactérie *Mycoplasma mycoides* avant de l'introduire dans une autre bactérie dépourvue de son propre chromosome.

Avec la levure, l'équipe conduite par Jef Boeke de l'université de New York, est la première à s'attaquer aux eucaryotes, organismes beaucoup plus complexes, dont l'homme fait partie : leurs cellules sont dotées de plusieurs chromosomes enfermés dans un noyau, alors que les bactéries ont un unique chromosome et pas de noyau. Le génome de la levure de boulanger totalise plus de 12 millions de paires de base (les « lettres » qui constituent l'alphabet de l'ADN) réparties en 16 chromosomes, quand l'unique chromosome de *Mycoplasma mycoides* n'en compte qu'un million.
Pour l'heure, l'équipe de Jef Boeke a synthétisé le chromosome n° 3 de la levure,



© ILLUSTRATION BY LUCY READING-IKKANDA

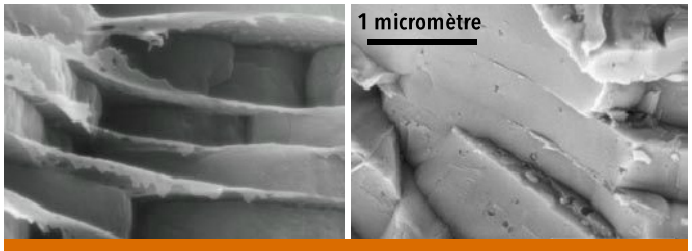
CETTE REPRÉSENTATION stylisée du chromosome n° 3 de la levure permet de visualiser, en jaune, les séquences présentes dans le chromosome naturel mais ôtées dans le chromosome synthétique, ainsi que d'autres modifications ponctuelles (épingles rouges et bleues).

l'un des plus courts, long de 316 617 paires de base. Elle l'a simplifié par étapes successives pour n'en garder que 272 871 jugées utiles, ce qui a mobilisé 49 étudiants pendant un an et demi. Et elle l'a intégré progressivement dans la cellule afin de ne pas provoquer de rejet. En optimisant cette méthode, Jef Boeke espère réaliser un génome de levure entièrement artificiel d'ici à quatre ans. ■ **Marie-Laure Théodule**

[1] N. Annaluru *et al.*, *Science, 344*, 55, 2014.

Technologie La nacre inspire des céramiques moins fragiles

Un matériau céramique dix fois moins fragile que les céramiques classiques, résistant à des températures d'au moins 600 °C, a été obtenu par des chercheurs français grâce à une nouvelle méthode de fabrication [1]. L'équipe de Sylvain Deville, du laboratoire commun du CNRS et de la société Saint-Gobain, à Cavaillon, dans le Vaucluse, s'est inspirée de la nacre d'un mollusque à coquille unique, l'ormeau.
La nacre est un matériau très tenace : elle rompt difficilement en présence de fissures internes, en raison de sa structure complexe et hiérarchique. Elle est composée à 95 % d'aragonite, forme de carbonate de calcium. Ce minéral est en lui-même fragile mais, dans la nacre, il est agencé sous la forme de briques soudées entre elles par des protéines. À plus grande échelle, les cristaux d'aragonite forment des colonnes où ils sont organisés selon des orientations multiples et croisées. Au sein d'une telle architecture, les fissures peinent à se frayer un chemin et se propagent donc peu.



© SYLVAIN DEVILLE © FLORIAN BOUVILLE

COMME LA NACRE D'ORMEAU (à gauche), la céramique bio-inspirée (à droite) est structurée en plaquettes agencées selon des orientations multiples, soudées par une très fine couche liquide.

Pour imiter cette structure, les physiciens ont choisi une poudre céramique courante, l'alumine, dont les grains ont la forme de plaquettes microscopiques. Ils l'ont placée en suspension dans l'eau, puis ont refroidi cette suspension afin d'obtenir une croissance contrôlée des cristaux de glace. Cela a conduit l'alumine à s'assembler sous la forme d'un empilement de plaquettes. Enfin, le matériau a été densifié au moyen d'un pressage à haute température. ■ **Jacques Abadie**

[1] F. Bouville *et al.*, *Nature Materials, 13*, 508, 2014.

➜ Bref

➜ VERBATIM

« La République a toujours reconnu dans les chercheurs cette mission exaltante de faire avancer partout dans le monde l'esprit humain dans ce qu'il a de meilleur. »

François Hollande,
le 3 avril 2014, à l'occasion du 50e anniversaire de l'Inserm.

➜ COGNITION

Café et Alzheimer

Connue pour protéger du déclin cognitif, la caféine retarderait aussi la maladie d'Alzheimer. Chez des souris transgéniques développant un des signes de la maladie, l'accumulation de protéines Tau, une consommation régulière de caféine prévient l'accumulation de ces protéines et les déficits de mémoire.

C. Laurent *et al.*, *Neurobiology of Aging*, doi:10.1016/j.neurobiolaging.2014.03.027, 2014.

➜ ASTRONOMIE

Planète cousine

Par sa taille et sa position par rapport à son étoile, Kepler-186f, exoplanète récemment découverte, est celle qui ressemble le plus à la Terre. À supposer qu'elle ait une atmosphère similaire à celle de notre planète, et de l'eau en surface, elle pourrait aussi être la seule exoplanète abritant de l'eau à l'état liquide.

E.V. Quintana *et al.*, *Science, 344,* 277, 2014.

Indicateur

1 million

d'Africains ont émigré à l'intérieur de l'Afrique de l'Ouest entre 2005 et 2010, contre 270 000 vers l'Europe de l'Ouest.

G.J. Abel et N. Sander, *Science, 343,*1520, 2014.

Web du mois

Des hommes et des loups

Tout, vous saurez tout sur la relation conflictuelle entre les hommes et les loups en France, du Moyen Âge au XXe siècle. Fruit d'une collaboration entre scientifiques et historiens, ce site s'appuie sur des témoignages et des documents pour chasser les idées reçues. ➜ *www.unicaen.fr/homme_et_loup/index.php*

Cancérologie

Pourquoi un traitement ciblé se trompe parfois de cible

L'ipilimumab est un des rares médicaments qui améliore la survie des personnes atteintes d'une forme grave de cancer de la peau, le mélanome métastatique. Mais il a parfois un effet secondaire pénible : dans 4 % des cas, il déclenche une inflammation de l'hypophyse, glande située à la base du cerveau et qui produit une large gamme d'hormones. Avec pour conséquences une fatigue extrême, des maux de tête et des nausées. Jusqu'à présent, les scientifiques restaient perplexes devant ce phénomène, l'ipilimumab étant censé agir de façon spécifique. Mais l'équipe menée par Patrizio Caturegli, de l'université Johns Hopkins, à Baltimore, aux États-Unis, pense avoir compris pourquoi l'hypophyse en est parfois victime [1]. Normalement, l'ipilimumab vise une molécule nommée CTLA-4, située à la surface de cellules immunitaires, les lymphocytes. Il s'y fixe, ce qui déclenche la prolifération des lymphocytes et les incite à attaquer les cellules cancéreuses. Mais Patrizio Caturegli et ses collègues ont découvert que chez certains patients, CTLA-4 se trouve aussi à la surface des cellules hypophysaires. Comme l'ipilimumab circule dans le sang, une petite quantité parvient jusqu'à ces cellules et s'y fixerait. Or cette association semble incongrue au système immunitaire : il produit des anticorps qui attaquent les cellules hypophysaires. Selon les auteurs, cette découverte pourrait inciter à utiliser des molécules cousines de l'ipilimumab, mais *a priori* moins susceptibles de déclencher ce type de réaction. ■

Mathias Germain

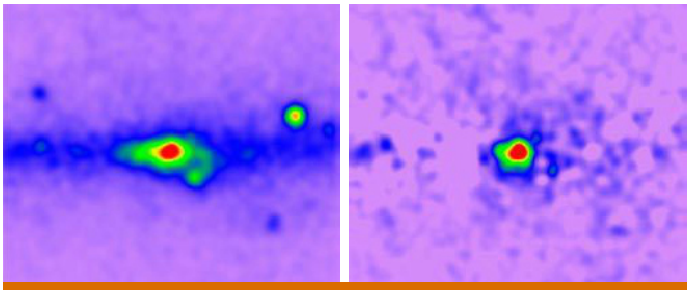
[1] S. Iwama *et al.*, *Sci. Transl. Med., 6(230),* 230ra45, 2014.

Physique Un excès de rayons gamma d'origine inconnue

Le centre de notre galaxie émet plus de rayons gamma qu'on ne le pensait ! Ce résultat, tout juste obtenu à partir des données du télescope spatial Fermi par l'équipe de Tracy Slatyer, du MIT, aux États-Unis, pose un défi aux astrophysiciens. Car si les auteurs de l'étude attribuent ce surplus à l'annihilation de particules de matière noire, cette matière de nature inconnue qui constitue près de 27 % de l'Univers, cette interprétation est loin de faire l'unanimité [1].

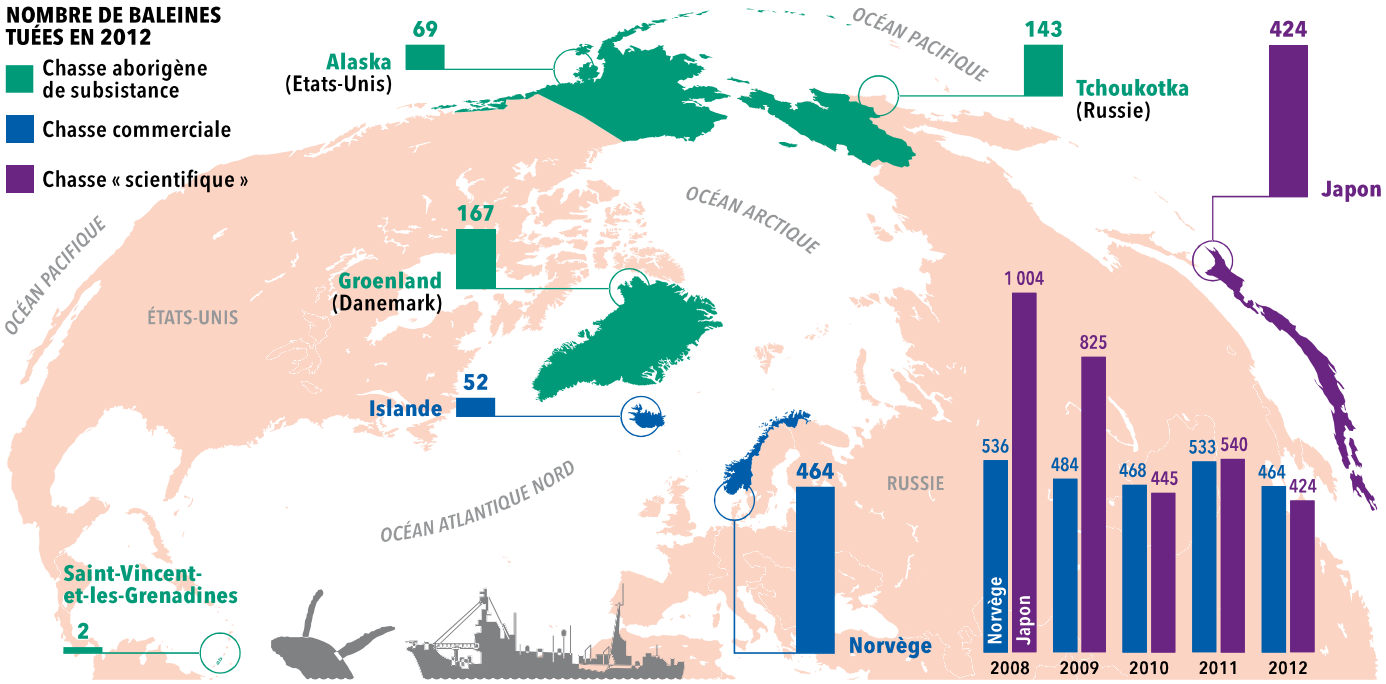
Comme tous les autres types de rayonnement, les rayons gamma sont composés de photons. Mais ceux-ci atteignent des énergies jusqu'à plusieurs centaines de gigaélectronvolts (GeV), soit des centaines de milliards de fois plus intenses qu'un photon de lumière visible par exemple. C'est grâce aux données de Fermi, lancé par la Nasa en 2008, et spécialisé dans la détection des rayons gamma, que Tracy Slatyer et ses collègues ont mené leur étude.

Les physiciens se sont concentrés sur les photons gamma dont ils pouvaient reconstituer avec certitude la trajectoire, et donc déterminer l'endroit d'où ils provenaient. Puis, ils ont entrepris d'identifier la source d'émission de chacun d'eux. Depuis les années 1960, époque où l'on a observé les rayons gamma pour la première fois, la théorie en prévoit plusieurs : les explosions d'étoiles en supernovæ ; la collision de particules de très haute énergie avec la matière circulant entre les étoiles ; ou l'annihilation de matière et d'antimatière, par exemple au niveau d'un trou noir. En soustrayant les rayons gamma imputables à chaque source d'émission connue, Tracy Slatyer et ses collègues ont découvert qu'il restait des photons gamma d'origine inexpliquée. « *Ils se trouvent dans*



CES IMAGES REPRÉSENTENT la quantité de rayons gamma au centre de la galaxie, avant (à gauche) et après (à droite) soustraction de ceux dont l'origine est connue. Le gradient de couleurs indique la concentration de rayons gamma : de la plus élevée (en rouge) à la plus faible (en violet).

Écologie Les chiffres de la chasse à la baleine



Trois types de chasse à la baleine sont reconnus par la Commission baleinière internationale : la chasse aborigène de subsistance (pratiquée par 4 pays), la chasse commerciale (2 pays), et la chasse avec « permis spécial », menée par le Japon sous couvert d'études scientifiques. Le 31 mars dernier, la Cour internationale de justice a invalidé cet argument concernant la chasse nipponne en Antarctique. Elle ne s'est en revanche pas prononcée sur son activité baleinière dans le Pacifique Nord. En 2012, le Japon a déclaré avoir tué un total de 424 baleines (une diminution de plus de 50 % par rapport à 2008), contre 464 pour la Norvège, qui pratique la chasse commerciale dans l'Atlantique du Nord-Est. Texte : Cécile Klingler, Infographie : Hervé Bouilly.
Sources : http://iwc.int/table_permit ; www.icj-cij.org/docket/files/148/18163.pdf

une zone, sphérique, de 5 000 années-lumière autour du centre de la galaxie », décrivait la physicienne lors d'une réunion de la Société américaine d'astrophysique, début avril, où les résultats étaient présentés.

Galaxies naines. Quelle en est la source ? Selon les auteurs, ces rayons gamma seraient dus à l'annihilation de particules de matière noire. *« Si l'on part de l'hypothèse que ces particules possèdent une énergie comprise entre 31 et 40 GeV,* détaille Tracy Slatyer, *alors on obtient un résultat qui s'accorde avec l'excès identifié. »*
Mais Gianfranco Bertone, de l'université d'Amsterdam, aux Pays-Bas, accueille cette interprétation avec réserve, *« étant donné notre compréhension très partielle des processus astrophysiques à l'œuvre au centre de notre galaxie »*.
Pour le physicien, il est impératif de confirmer ce résultat par d'autres observations : *« Un résultat intéressant serait de retrouver ce même excès de rayons gamma dans des galaxies naines voisines de la Voie lactée. D'après la théorie, qui prédit que leur densité en matière noire est très élevée, c'est en effet là que l'on a le plus de chances d'observer ce phénomène. »* ■ **Vincent Glavieux**

[1] T. Daylan *et al.*, arXiv:1402.6703, 2014.

© DAYLAN ET AL. / IMAGES COURTESY OF TIM LINDEN, UNIV. OF CHICAGO

➜ Bref

➜ VERBATIM

« La cécité de nos responsables politiques et administratifs devant la quasi-banqueroute de nos laboratoires […] annonce un déclin français accéléré avec un décrochage de nos performances d'ici à 2020. »

Philippe Froguel, directeur de recherche CNRS, professeur à l'Imperial College de Londres, *Le Figaro*, 7 avril 2014.

➜ ENVIRONNEMENT

Petite banquise arctique

Atteinte le 21 mars dernier, l'extension maximale de la banquise arctique a été de 14,91 millions de kilomètres carrés seulement. Ce pic est le 5e plus bas depuis 1978, date des premiers bilans complets par satellite.

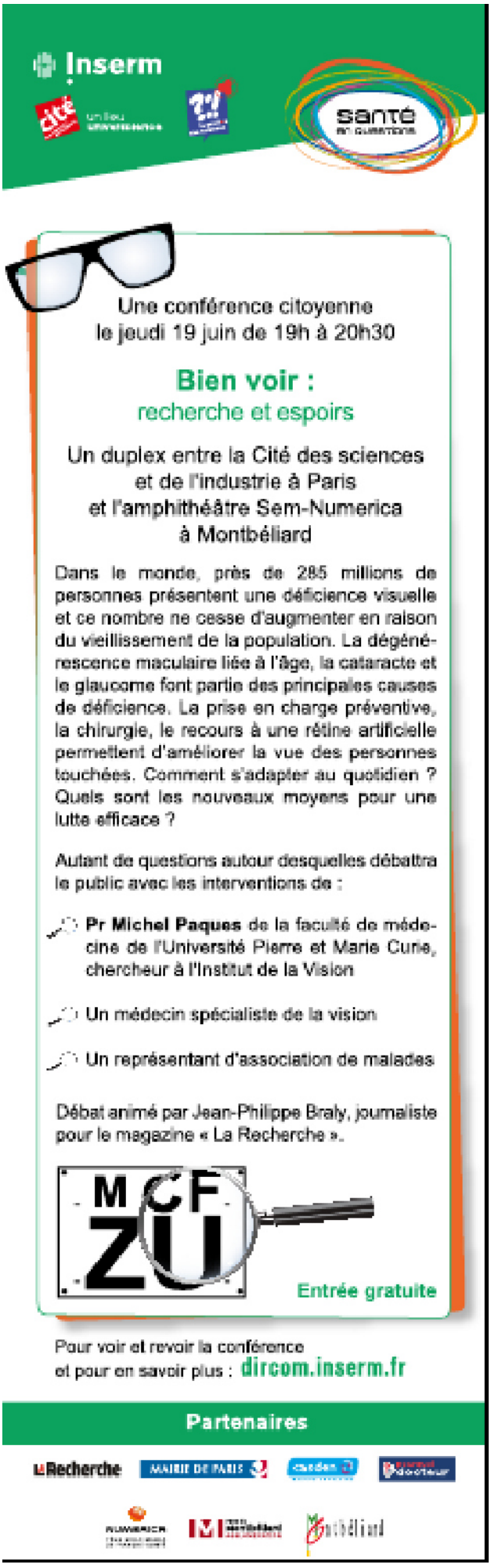
http://nsidc.org/news/press/2014_maximum_MA.html

➜ SANTÉ

Le syndrome du Golfe expliqué ?

En comparant 7 anciens combattants atteints du syndrome de la guerre du Golfe, à 7 autres en bonne santé, des médecins américains ont découvert que leurs mitochondries, productrices d'énergie, fonctionnaient moins bien. Cela peut expliquer tous les symptômes, de la fatigue aux troubles du comportement.

H. J. Koslik *et al.*, *Plos One*, 9(3):e92887, 2014.



Technologie

Quand l'électronique colle à la peau

Fabriquer des capteurs biomédicaux souples comme une seconde peau, voilà une ambition partagée par de nombreux laboratoires dans le monde. Mais alors que la plupart tentent d'y arriver en développant des composants électroniques flexibles, l'équipe sino-américaine coordonnée par John Rogers, de l'université de l'Illinois, aux États-Unis, vient d'y parvenir en suivant une approche très différente : utiliser des composants électroniques disponibles dans le commerce, donc rigides [1].

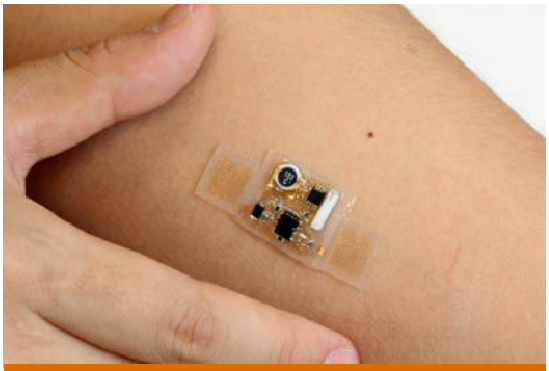
Pour que leur dispositif épouse au mieux les mouvements de l'épiderme, ces spécialistes de science des matériaux ont eu deux idées originales. La première : placer les composants électroniques (électrodes, émetteur de radiofréquences ou minibatterie) en suspension dans un fluide légèrement visqueux d'environ 1 millimètre d'épaisseur. Constitué de silicone, ce fluide sert d'isolant électrique et thermique et évite la corrosion.

La seconde innovation consiste à relier ces éléments rigides par un réseau de filaments capables de s'étirer ou de se rétracter. Formés de cuivre recouvert de polyimide, ces filaments sont disposés en serpentin, ce qui leur confère une grande élasticité. Le tout est enveloppé par une très fine couche transparente d'élastomère.

D'après ses concepteurs, l'ensemble endure sans dommages des étirements de 30 % et des torsions jusqu'à des angles de 75 degrés, ce qui le rend « *à peine perceptible par la personne qui le porte* ».

Sur le plan fonctionnel, de premiers tests ont permis d'enregistrer, entre autres, un électrocardiogramme lorsque le patch était placé sur la poitrine d'un volontaire. ■

Mathias Germain



© COURTESY OF JOHN A. ROGERS, UNIV. OF ILLINOIS

CE PATCH MÉDICAL adhère parfaitement à la peau, en dépit de ses composants électroniques rigides. En effet, ceux-ci reposent en suspension dans le silicone fluide dont le patch est empli.

[1] S. Xu *et al.*, *Science, 344,* 70, 2014.

Archéologie

Comment Neandertal chassait-il le mammouth ?

Pour les hommes de Neandertal, tuer un mammouth ne devait pas être chose aisée. Sur le site de la Cotte, le long de la côte de Saint-Brélade, sur l'île anglo-normande de Jersey, les archéologues ont pourtant retrouvé un grand nombre d'os de mammouths au pied d'une falaise. Dans les années 1980, l'analyse des faunes laissait penser que les néandertaliens usaient d'une méthode de chasse particulière : rabattre les animaux vers une fissure de la falaise pour qu'ils y tombent. Mais une nouvelle étude de la topographie du site vient remettre en question cette hypothèse [1].

AU PIED DE CETTE FALAISE, ont été retrouvés de nombreux os de mammouths de 230 000 à 40 000 ans. Il n'est toutefois pas certain que les animaux aient été chassés. © NICOLAS JOUAULT

Les archéologues britanniques qui l'ont menée à bien ont reconstitué le paysage tel qu'il était à l'époque, en particulier en sondant le fond de la mer grâce à des sonars. Résultat : entre 230 000 et 40 000 ans avant notre ère, le niveau de la mer étant bien plus bas durant les périodes froides, la Cotte de Saint-Brélade n'était pas qu'un plateau dont les falaises dominaient la plaine. On trouvait tout autour des canyons et vallées qui formaient un paysage chaotique.

Les archéologues avancent qu'il aurait été difficile aux chasseurs de diriger des animaux aussi massifs que des mammouths à travers un paysage si accidenté. Reste que la présence des ossements au bas de la falaise n'est pas expliquée. « *L'équipe doit encore faire plusieurs analyses,* indique Jean-Philip Brugal, du laboratoire méditerranéen de préhistoire d'Aix-en-Provence. *Ils ont raison de remettre en question l'hypothèse de la conduite vers ce piège naturel, mais il faut garder en tête que ces animaux ont tout aussi bien pu tomber dans la fissure par accident.* » ■ **Rémi Canali**

[1] B. Scott *et al.*, *Antiquity, 88,* 13, 2014.

L'Europe bloque sur les biocarburants

Les pays de l'Union se déchirent sur l'aide qu'il faudrait accorder aux biocarburants. Première, ou deuxième génération ?

Les biocarburants donnent la migraine aux responsables européens. Cette énergie renouvelable est subventionnée par l'Europe depuis 2008, année où il avait été décidé qu'à échéance de 2020, 10 % des carburants utilisés dans les transports devaient provenir d'une source renouvelable. Mais assez vite, les critiques ont fusé : le bilan environnemental des biocarburants dits de première génération, ceux à base de blé, betterave, maïs, colza, soja ou canne à sucre, est défavorable. À la fois en termes d'émissions de gaz à effet de serre, mais aussi parce que leurs cultures, en particulier céréalières, entrent en concurrence avec celles dédiées à l'alimentation. Depuis, experts, parlementaires et lobbies agricoles s'affrontent. En 2012, la Commission propose de plafonner à 5 % la part des biocarburants de première génération et commande une étude sur ce que l'on appelle les ILUC, les émissions de gaz à effet de serre indirectes liées au changement d'affectation des sols. Par exemple, plus de champs de blé pour le bioéthanol au détriment des forêts. En 2013, le Parlement européen propose un compromis à 6 %. Las ! Certains pays comme la Pologne, gros producteur de betteraves à éthanol, s'y opposent. Du coup, aucun objectif chiffré n'a été établi pour 2020, pas plus que pour 2030. Et cela ne fait pas l'affaire des producteurs de biocarburants dits de « deuxième génération », *a priori* plus « verts », produits à partir de déchets agricoles, d'algues, ou grâce au travail de bactéries. « *Le blocage actuel est un coup porté à la deuxième génération car il faut que les technologies puissent bénéficier d'aides à la R&D* », remarque un parlementaire à Strasbourg. Suite du feuilleton… après les élections européennes. ■ **Aline Richard**

LE BIOÉTHANOL qui sort de la distillerie d'Arcis-sur-Aube, dans la région Champagne-Ardenne, est issu de la transformation de céréales et de betteraves. © S.LEITENBERGER/RÉA

→ VULGARISATION

Succès des musées

Une étude internationale portant sur 17 musées de science dans 13 pays a montré qu'il existait un lien entre les visites du public et un plus fort intérêt pour la science et les technologies, dans ses aspects de connaissance, de compréhension, de curiosité et d'engagement dans des activités scientifiques. Cependant, l'étude ne dit pas si les personnes qui vont au musée sont déjà concernées par la science ou bien s'il s'agit d'un public plus diversifié.

→ RÉSEAUX

Wikipédia mesure la grippe

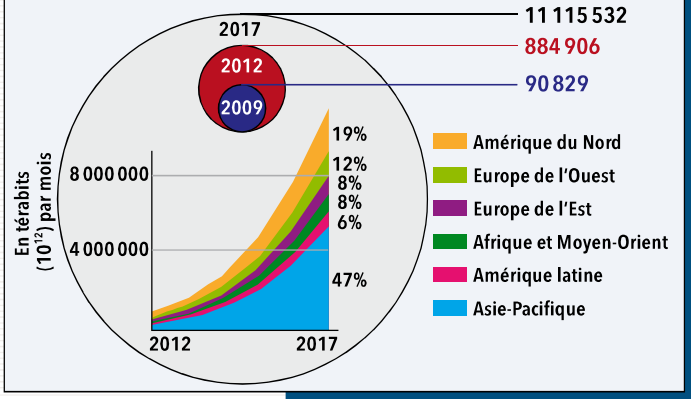
Pour estimer le nombre de cas de grippe à travers l'analyse de requêtes sur le Web, Wikipédia se révèle plus fiable que les « Flu Trends » de Google. Un professeur de l'école de médecine de Harvard a développé un algorithme fondé sur les pages vues de l'encyclopédie en ligne, a comparé le résultat obtenu aux statistiques sanitaires américaines et a montré une bonne concordance.

→ DÉVELOPPEMENT

Big Data : quel bénéfice pour le Sud ?

L'explosion du volume des données numériques est aussi une réalité dans les pays en développement. En Asie, en Amérique latine, en Afrique (*via* les téléphones mobiles) ou au Moyen-Orient, les données s'accumulent. Le traitement et l'analyse de ces flux profiteront-ils au développement ? La réponse n'est pas simple, tant les situations diffèrent. Le Big Data permet aux pays de se doter d'un appareil statistique performant de gestion publique. Mais, faute de personnel qualifié et d'une connaissance des biais de sélection, les data risquent d'induire en erreur les décideurs. Source : SciDev.net

L'EXPLOSION DES DONNÉES PAR ZONES GÉOGRAPHIQUES



Horloges cellu

Comment elles contrôlent

© LARRY LIMNIDIS/IMAGEZOO/GETTY

Notre organisme suit un rythme dit « circadien » d'environ 24 heures . Le connaître précisément permet de mieux se soigner. Le perturber fait courir des risques.

laires

Dossier préparé par Cécile Kingler

nos rythmes et notre santé

« *Les jours sont peut-être égaux pour une horloge, mais pas pour un homme.* » Difficile aujourd'hui de suivre Marcel Proust dans cette voie, tant les avancées scientifiques montrent que l'homme n'est qu'horloges : chacun de nos organes, chacune de nos cellules, en possède une, qui suit un rythme d'environ 24 heures. De ces rythmes si profondément ancrés, les médecins savent désormais tirer parti. Pour soigner plus efficacement, en administrant des traitements aux heures les plus favorables. Mais aussi pour mieux comprendre les pathologies – obésité et diabète en tête. Après la chronobiologie, voici venu le temps de la chronomédecine.

1 **Ces horloges qui rythment notre vie** par Cécile Klingler

2 **Un organisme réglé comme une pendule** par Cécile Klingler

3 **Cancer : frapper au bon moment** par Francis Lévi

4 **Quand perdre le rythme fait prendre du poids** par Anne Debroise

1 • Ces horloges qui rythment notre vie

Notre corps vit au rythme de 24 heures, mais les horloges qui nous entourent n'y sont pas pour grand-chose. Comme chez tous les êtres vivants, une horloge interne bat dans chacune de nos cellules.

PAR Cécile Klingler,
journaliste.

Etes-vous du soir ou du matin ? Pour en avoir le cœur net, rien de plus facile. Il suffit de répondre au questionnaire conçu en 1976 par Jim Horne et Olof Östberg, à l'université de Loughborough, au Royaume-Uni. Dix-neuf questions seulement, qui font aujourd'hui référence dans la plupart des centres de sommeil. Dix-neuf questions qui mettent l'accent sur notre « rythme naturel » : celui que nous aimerions suivre, si nous étions affranchis des contraintes horaires de la vie quotidienne.

Alors, coq ou hibou ? Une chose est sûre, quel que soit votre animal totem, mieux vaut le respecter. Car vouloir transformer un chanteur matinal en hululeur nocturne – ou inversement – signifie contrarier l'un des mécanismes les plus ancrés qui soient dans le monde vivant : l'horloge circadienne, système grâce auquel tout notre corps fonctionne suivant des cycles réguliers d'environ 24 heures. Or, on le sait désormais, le perturber, c'est courir le risque d'y laisser des plumes, tant cette horloge est indissociable de la moindre de nos cellules.

Dans son laboratoire de l'institut Douglas, à Montréal, au Canada, Nicolas Cermakian étudie le fonctionnement de l'horloge circadienne et les liens qu'elle entretient avec le système immunitaire. Ailleurs dans le monde, une multitude d'autres équipes scrutent le rôle de l'horloge dans le fonctionnement du pancréas, du foie, du cœur, du tissu adipeux, du cerveau, etc. « *La chronobiologie est en train de révolutionner la physiologie, et bientôt, la médecine !* », s'exclame le chercheur québécois, enthousiaste face aux changements qui ont bouleversé son domaine de recherche.

« *Il y a quinze ans, ce sont les mécanismes moléculaires de l'horloge qui étaient au centre de l'attention* », se remémore-t-il. Lui-même les étudiait alors en tant que chercheur postdoctorant dans le laboratoire strasbourgeois de Paolo Sassone-Corsi. « *En 1997,* poursuit-il, *à l'université du Texas, Joseph Takahashi avait identifié le gène* Clock, *premier gène impliqué dans le fonctionnement de l'horloge circadienne des mammifères. Cela a déclenché une course pour en trouver d'autres, et comprendre leur fonctionnement.* »

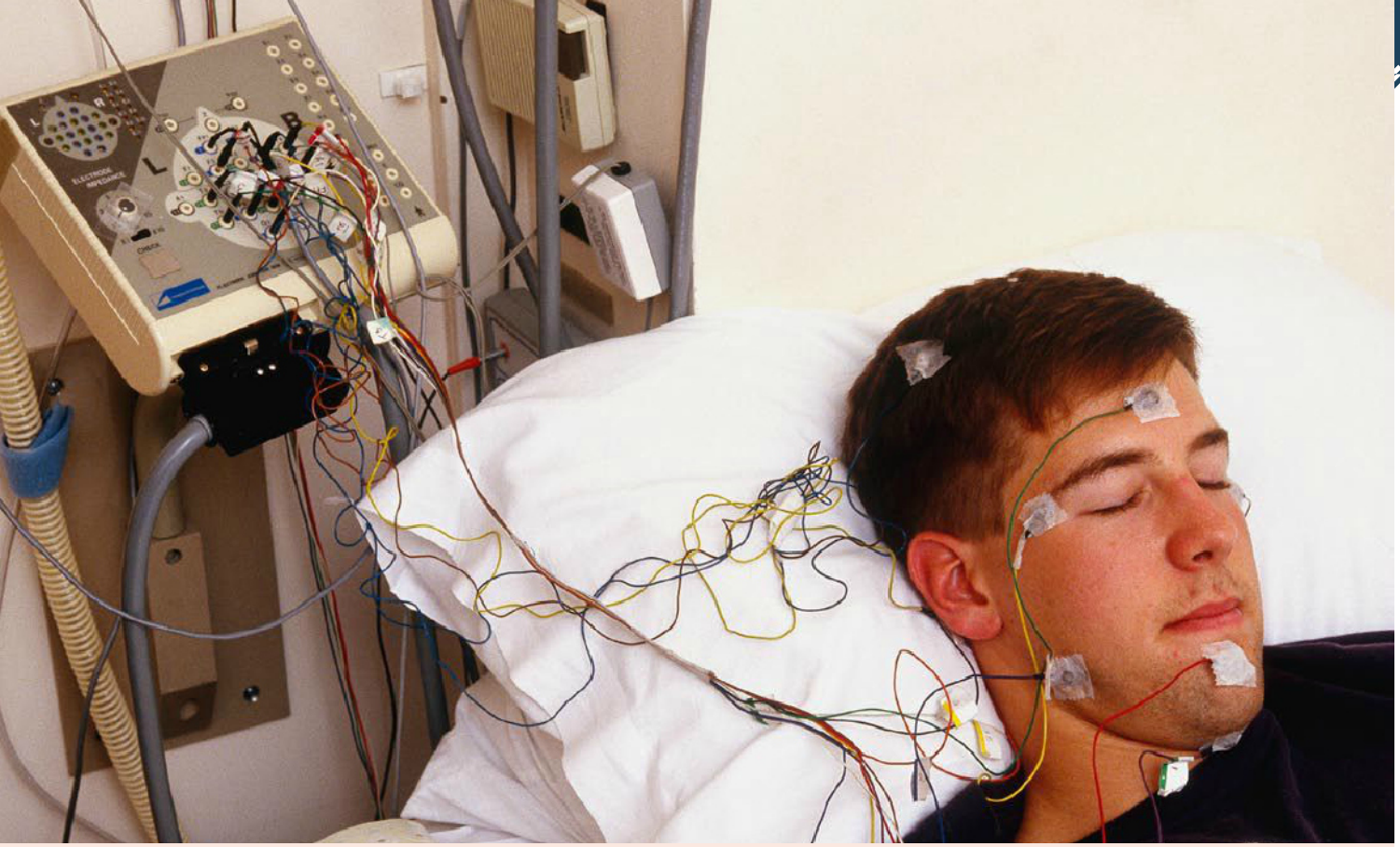
Isolement temporel. Cette approche moléculaire représentait une avancée considérable par rapport aux débuts de la chronobiologie animale. Des débuts en partie marqués par une forte médiatisation. En 1962 en effet, le spéléologue français Michel Siffre descend au fond du gouffre glaciaire de Scarasson, dans les Alpes-Maritimes. Le jeune homme de 23 ans veut expérimenter la « *perte de la notion de temps* ». Il passera deux mois, du 17 juillet au 14 septembre 1962, à environ 100 mètres de profondeur, dans un froid constant, sans montre, signalant chacun de ses réveils, de ses repas et de ses couchers à ses contacts en surface, *via* un système de communication à sens unique. L'analyse des données montre que chacune de ses journées dure environ 24 h 30. C'est la démonstration que le corps humain renferme une horloge autonome. Cette « expérience d'isolement temporel » reçoit un large écho public.

L'essentiel

> MÊME PLONGÉS dans un environnement qui nous isole du monde extérieur, nous vivons selon un rythme d'environ 24 heures.

> JUSQU'AU MILIEU DES ANNÉES 1990, cette rythmicité était imputée à une unique horloge interne, située dans une zone très précise du cerveau.

> AUJOURD'HUI, la preuve est faite que la plupart de nos organes renferment eux aussi une horloge. Mais comprendre leurs interactions demeure un défi.



Ce patient est endormi dans une salle d'isolement temporel. Des capteurs enregistrent son rythme cérébral et cardiaque, et l'alternance entre veille et sommeil. L'ensemble permet de déterminer son rythme circadien.

Dans le même temps, hors du feu des projecteurs, les scientifiques conçoivent les premières expériences de laboratoire visant à comprendre le fonctionnement de l'horloge circadienne des animaux (celle des plantes, elle, est étudiée depuis le XVIII[e] siècle).

Sous la houlette d'Irving Zucker, à l'université de Californie, et de Robert Moore, à l'université de Chicago, diverses expériences menées chez des rongeurs mettent en évidence les structures responsables de ce rythme auto-entretenu, indépendant des variations de l'environnement : deux groupes symétriques de 10 000 neurones chacun, situés dans le cerveau, à la base de l'hypothalamus, juste au-dessus de l'endroit où les deux nerfs optiques se croisent. Leur nom ? Les « noyaux suprachiasmatiques ». Au début des années 1970, même si on ne comprend pas encore leur fonctionnement, leur rôle dans la régulation des rythmes physiologiques est indéniable : des rats chez lesquels ces noyaux sont détruits perdent tous leurs rythmes naturels, dont le plus flagrant, l'alternance veille-sommeil.

En parallèle se déroulent les premières études génétiques des rythmes circadiens chez la drosophile, la « mouche du vinaigre », prisée des généticiens. À l'époque déjà, on peut en obtenir des mutants variés, ce qui permet de déterminer si telle ou telle caractéristique est sous contrôle génétique. Or deux scientifiques hors normes, deux précurseurs, Seymour Benzer et son étudiant en thèse, Ronald Konopka, sont persuadés qu'il existe un déterminant génétique des rythmes circadiens. À l'Institut californien de technologie, ils examinent des larves de drosophile pendant des heures, recherchant des mutants dont le rythme d'éclosion serait plus court ou, au contraire, plus long que la normale. Puis, après en avoir repéré plusieurs, ils regardent si les mouches qui en descendent présentent des variations dans l'alternance du rythme veille-sommeil. Un travail de titan, sous l'œil passablement incrédule de leurs confrères. Et pourtant… En 1971, tous deux identifient un gène qui leur semble déterminer le tempo de l'organisme. Ils l'appellent *Period* (abrégé en *Per*).

Chef d'orchestre cérébral. Il faudra attendre 1984, et l'avancée des techniques de biologie moléculaire, pour que ce gène de drosophile soit cloné et séquencé, suivi de plusieurs autres. Puis treize autres années encore, avant que Joseph Takahashi identifie *Clock*, premier gène d'horloge d'un mammifère [1]. Dans la foulée, on découvre son homologue chez la drosophile, tandis qu'inversement, des homologues de gènes d'horloges de drosophile sont mis en évidence chez la souris.

En 1997, au regard de ce chassé-croisé de résultats, il semble que toutes les pièces détachées se mettent finalement en place : les neurones des noyaux suprachiasmatiques ont un fonctionnement cyclique, grâce aux gènes d'horloge qui >>>

© HANK MORGAN/SCIENCE SOURCE/BSIP

Ces horloges qui rythment notre vie

›››› s'expriment suivant un rythme circadien [fig. 1]. Du coup, les ordres qu'ils donnent au corps sont, eux aussi, circadiens. L'image d'un chef d'orchestre cérébral, grand manitou des rythmes de tout le corps, est bien dessinée.

Pas pour longtemps ! « *En 1998, un article a pris tout le monde par surprise* [2], raconte Nicolas Cermakian. *Aurélio Balsalobre, alors en post-doctorat dans l'équipe d'Ueli Schibler, à Genève, en Suisse, a observé une expression rythmique de plusieurs gènes, dont des gènes d'horloge, dans des cellules de tissu conjonctif en culture. Donc, hors du contrôle d'une horloge centrale.* »

Cela semblait si improbable qu'au départ, personne ne voulut y croire. L'hypothèse privilégiée, y compris par les auteurs de l'article, était que cette expression circadienne était déclenchée par un composant du milieu de culture utilisé. Mais en 2004, il a bien fallu se rendre à l'évidence. « *Nous avons prouvé que cette rythmicité circadienne était bel et bien spontanée, dans chacune des cellules* [3], en sourit encore Ueli Schibler. *Le milieu, lui, avait simplement pour effet de les synchroniser les unes avec les autres.* »

On le sait maintenant, les cellules de la plupart des organes possèdent une horloge intrinsèque. Mais il existe une différence majeure entre l'horloge centrale, celle des noyaux suprachiasmatique, et les horloges périphériques : la première a le pouvoir de synchroniser les secondes. Comment ? « *Cela fait plus de dix ans qu'on y travaille, et on n'a pas encore toutes les réponses,* prévient Nicolas Cermakian. *On sait que ce contrôle s'exerce de nombreuses manières, par des voies directes et indirectes. Dans le premier cas, les informations sont transmises soit par des voies nerveuses allant vers l'organe cible, soit par des hormones sécrétées par l'hypophyse, sous contrôle de l'hypothalamus.* »

Contrôle indirect. Le contrôle indirect, lui, découle du fait que l'horloge centrale rythme l'alternance entre la veille et le sommeil. Or, qui dit veille dit prise de nourriture. « *Les horaires d'alimentation sont un synchronisateur très puissant des horloges périphériques* », souligne Nicolas Cermakian. « *Je dirais même que le rythme de prise de nourriture est de loin le facteur dominant dans leur régulation* », appuie Ueli Schibler (lire « Un organisme réglé comme une pendule », p. 32).

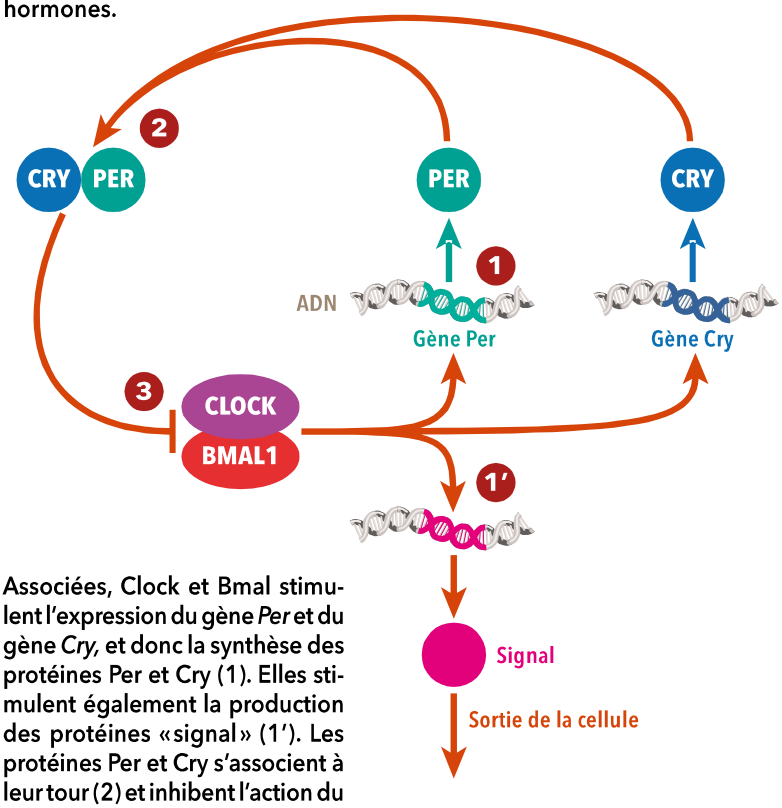
Concernant ces horloges périphériques, les chercheurs ne sont en tout cas pas au bout de leurs surprises. Pendant toutes ces années, en effet, ils ont dû se contenter de les étudier soit en utilisant des cultures de cellules, soit en étudiant des organes prélevés *post mortem*. Mais depuis 2013, grâce à un système mis au point dans le laboratoire d'Ueli Schibler, il est possible de suivre l'expression circadienne des gènes chez des souris éveillées et libres de leurs mouvements [4].

Bien évidemment, il ne s'agit pas de souris quelconques. Ce sont des animaux transgéniques dont l'un ou l'autre gène circadien est couplé à un gène de luciole. Il code une enzyme, la luciférase, qui produit une émission lumineuse en présence d'une protéine appelée luciférine. Cette approche est classiquement utilisée en biologie avec des cellules ou des organes isolés : il suffit en effet de les mettre en présence de luciférine pour voir si le gène étudié s'exprime. Mais avec un animal vivant, c'est bien plus compliqué…

L'équipe d'Ueli Schibler y est parvenue en utilisant une cage cylindrique munie de tubes

Fig.1 La genèse des rythmes

LE FONCTIONNEMENTD'UNE CELLULE selon un rythme circadien repose sur quelques molécules, dont Clock, Bmal1, Per et Cry. En interagissant de façon cyclique, elles contrôlent la production, elle aussi cyclique, de substances libérées par cette cellule, par exemple des hormones.



Associées, Clock et Bmal stimulent l'expression du gène *Per* et du gène *Cry*, et donc la synthèse des protéines Per et Cry (1). Elles stimulent également la production des protéines « signal » (1'). Les protéines Per et Cry s'associent à leur tour (2) et inhibent l'action du duo Clock/Bmal (3), interrompant la production de Per et de Cry, et celle des molécules « signal ». Le cycle reprend au bout de vingt-quatre heures une fois que les concentrations de Per et Cry ont diminué. © INFOGRAPHIE SYLVIE DESSERT

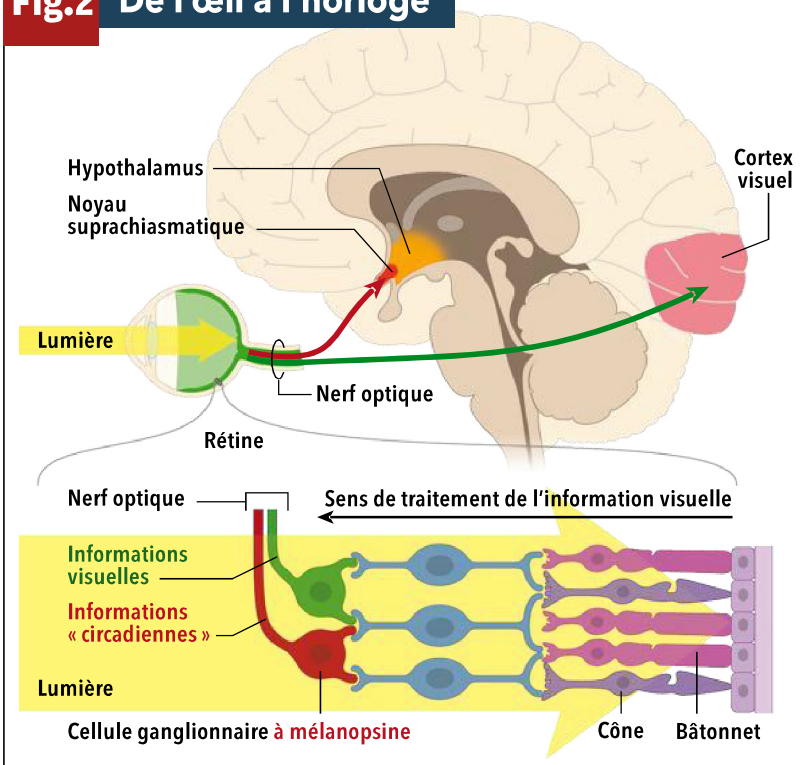
photomultiplicateurs détectant la lumière émise où que se trouve l'animal, pourvu que l'organe étudié émette suffisamment de photons. « *Nous avons suivi l'expression d'un gène d'horloge dans le foie d'animaux dont les noyaux suprachiasmatiques étaient endommagés,* explique Ueli Schibler. *Nous avons alors constaté que cette horloge se synchronisait bien plus rapidement avec les heures de prise de nourriture chez ces animaux que chez ceux dont l'horloge centrale était intacte.* »

De premiers résultats prometteurs, qui en annoncent bien d'autres. Car depuis, les chercheurs suisses ont amélioré leur technique. Lors des premières expériences la luciférine était délivrée aux animaux par une minipompe, ce qui limitait l'observation à quelques jours et, partant, limitait aussi l'interprétation des résultats. « *Mais maintenant, cela fonctionne aussi lorsque les souris absorbent la luciférine* via *l'eau de boisson. Du coup, les observations vont pouvoir durer des mois* », s'enthousiasme Ueli Schibler.

Pour Nicolas Cermakian, ce système d'étude est une avancée marquante. « *Jusqu'à présent, nous étudiions des souris transgéniques privées d'un gène d'horloge dans un tissu donné,* rappelle-t-il. *Et cela a fourni des informations précieuses.* » Par exemple, la suppression de l'horloge dans certaines cellules immunitaires, les macrophages, inhibe la réponse immunitaire dite « innée », celle qui intervient en première ligne pour contrer une infection bactérienne ou virale. Tandis que sa suppression dans le pancréas favorise l'apparition d'un diabète de type 2 (voir « Quand perdre le rythme fait prendre du poids », page 37). « *Mais,* insiste le chercheur québécois, *l'outil développé par Ueli Schibler va permettre d'avoir une vision beaucoup plus intégrée du rôle des horloges, de la façon dont elles sont synchronisées, ou désynchronisées.* »

Facteurs de désynchronisation. Il ne s'agit pas là de « simple » curiosité scientifique : c'est bel et bien de physiologie et de santé humaine dont il est question dans un monde où les facteurs de désynchronisation des horloges ne font que se multiplier. Normalement, en effet, notre horloge interne se cale sur l'alternance jour-nuit, autrement dit, sur un cycle de 24 heures. Tant chez les « coqs », dont l'horloge interne est un peu plus rapide, que chez les « hiboux », où elle est un peu plus lente. Cet ajustement sur le rythme de rotation de la Terre a lieu grâce à certaines cellules non visuelles, les « cellules ganglionnaires à mélanopsine », qui détectent l'alternance jour-nuit et transmettent cette information aux noyaux suprachiasmatiques [fig. 2].

Fig.2 De l'œil à l'horloge



LORSQUE LA LUMIÈRE parvient à la rétine, elle y active principalement les cônes et les bâtonnets, cellules sensorielles de la vision. Mais elle active aussi quelques cellules ganglionnaires, dites à « mélanopsine » (en rouge), du nom du pigment photosensible qu'elles possèdent. Les signaux que produisent ces dernières transmettent les informations concernant l'alternance jour-nuit aux noyaux suprachiasmatiques, qui constituent l'horloge circadienne centrale. Tandis que l'information visuelle provenant des cônes et des bâtonnets est transmise au cortex visuel. © INFOGRAPHIE SYLVIE DESSERT

Mais depuis la généralisation de l'électricité, on ne se lève plus avec le soleil, on ne se couche plus sitôt la nuit tombée. « *C'est perturbant pour l'horloge centrale, mais aussi pour les horloges périphériques,* explique Claude Gronfier, du département de chronobiologie de l'Inserm, à Lyon. *Car les rythmes veille-sommeil étant déréglés, les rythmes alimentaires le sont aussi. C'est un peu comme si toutes nos horloges étaient soumises à des ordres sinon contradictoires, du moins incohérents. Et la multiplication des écrans d'ordinateurs, de tablettes, de smartphones n'arrange rien. Ils émettent en effet de la lumière bleue, celle à laquelle les cellules ganglionnaires à mélanopsine sont le plus sensibles !* »

Résultat : comme l'a montré Till Roenneberg, de l'université Ludwig-Maximilians à Munich, en Allemagne, beaucoup d'entre nous vivent un « jetlag social » [5]. Avec un cortège de troubles, qu'il s'agisse de troubles du sommeil ou du métabolisme. Grâce aux souris à luciférase, il devrait être possible de mieux comprendre leur genèse. Mais pour y remédier, les coqs et les hiboux que nous sommes auraient intérêt à écouter davantage leur horloge. ■

[1] D.P. King *et al., Cell, 89,* 641, 1997.
[2] A. Balsalobre *et al., Cell, 93,* 929, 1998.
[3] E. Nagoshi *et al., Cell, 119,* 693, 2004.
[4] C. Saini *et al., Genes Dev., 27,* 1526, 2013.
[5] T. Roenneberg, *Internal Time : Chronotypes, Social Jet Lag, and Why You're So Tired,* Harvard University Press, 2012.

2 • Un organisme réglé

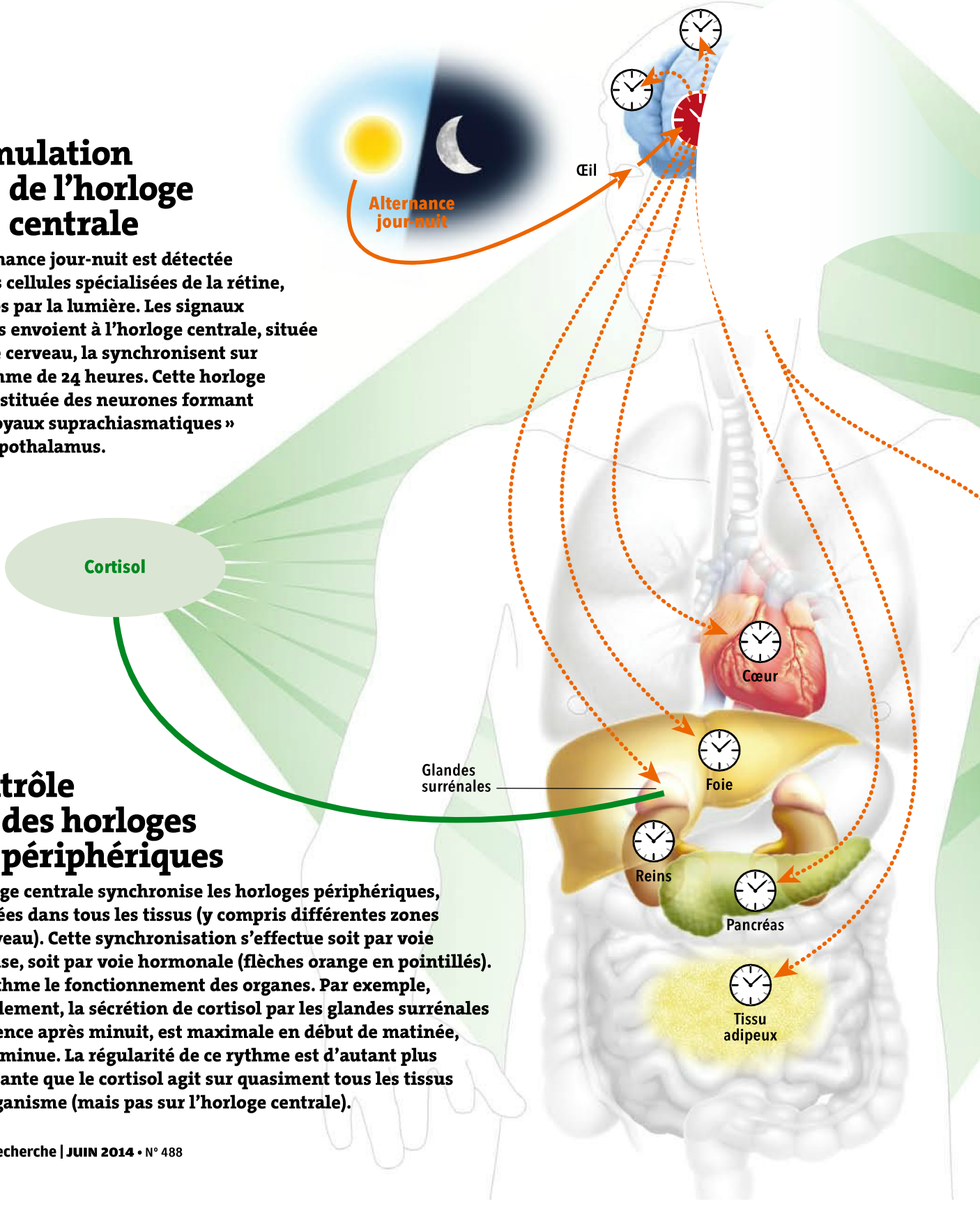
Toutes les activités de notre corps suivent un rythme précis, dont la cadence est donnée par différentes horloges.

Stimulation de l'horloge centrale

L'alternance jour-nuit est détectée par des cellules spécialisées de la rétine, activées par la lumière. Les signaux qu'elles envoient à l'horloge centrale, située dans le cerveau, la synchronisent sur un rythme de 24 heures. Cette horloge est constituée des neurones formant les « noyaux suprachiasmatiques » de l'hypothalamus.

Contrôle des horloges périphériques

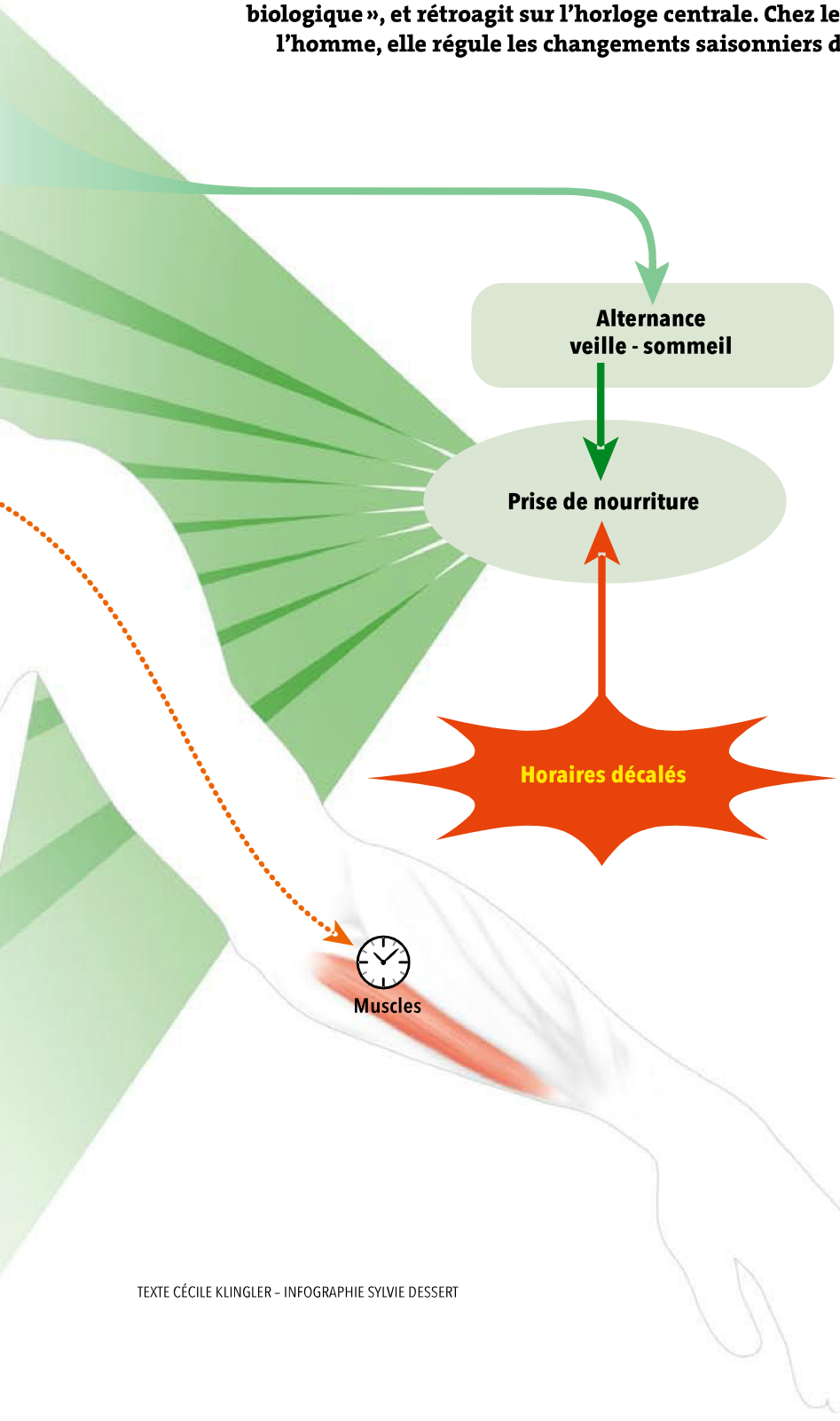
L'horloge centrale synchronise les horloges périphériques, localisées dans tous les tissus (y compris différentes zones du cerveau). Cette synchronisation s'effectue soit par voie nerveuse, soit par voie hormonale (flèches orange en pointillés). Elle rythme le fonctionnement des organes. Par exemple, normalement, la sécrétion de cortisol par les glandes surrénales commence après minuit, est maximale en début de matinée, puis diminue. La régularité de ce rythme est d'autant plus importante que le cortisol agit sur quasiment tous les tissus de l'organisme (mais pas sur l'horloge centrale).



comme une pendule

Sécrétion de mélatonine

En plus de synchroniser les horloges périphériques, l'horloge centrale agit sur la glande pinéale : elle lui indique quand il fait nuit, ce qui déclenche la production, par cette glande, de mélatonine. Libérée dans le sang, cette hormone définit la « nuit biologique », et rétroagit sur l'horloge centrale. Chez les animaux autres que l'homme, elle régule les changements saisonniers de l'activité reproductrice.



Veille et prise de nourriture

La synchronisation, par l'horloge centrale, de certaines horloges périphériques du cerveau, régule l'alternance entre la veille et le sommeil, autrement dit entre la période où l'organisme s'alimente, et celle où il se repose. Les horaires de prise de nourriture exercent sur les horloges secondaires un effet synchronisateur indépendant de celui exercé par l'horloge centrale.

Perturbation

Le travail en horaires décalés perturbe souvent les horaires de prise de nourriture, ce qui dérègle fortement les horloges périphériques. Étant donné le rôle de ces dernières dans la physiologie de l'organisme, les conséquences sur la santé peuvent être sévères. Elles s'ajoutent aux effets délétères découlant directement de la mauvaise synchronisation de l'horloge centrale, du fait du non-respect de l'alternance jour-nuit.

TEXTE CÉCILE KLINGLER – INFOGRAPHIE SYLVIE DESSERT

3 • Cancer : frapper au bon moment

Les cellules cancéreuses ont leur propre tempo. Une caractéristique dont la chronothérapie tire parti pour soigner les patients au meilleur moment. Aujourd'hui, elle entre dans l'ère de la médecine personnalisée.

PAR **Francis Lévi,** pionnier de la chronothérapie, directeur de recherche dans l'unité mixte « rythmes biologiques et cancers », à l'hôpital Paul-Brousse de Villejuif, et professeur d'oncologie clinique à l'université de Warwick, à Coventry, au Royaume-Uni.

Doubler l'efficacité d'un traitement antitumoral tout en réduisant de deux à dix fois ses effets secondaires ? Cela semble impossible. Pourtant, c'est bel et bien le résultat obtenu par mon équipe et 9 autres centres de cancérologie, à l'issue de 2 études internationales menées chez 278 patients atteints de cancer colorectal métastatique [1]. C'était en 1997, et ces essais étaient les premiers à évaluer, chez un grand nombre de patients, l'efficacité de la chronothérapie : le fait d'administrer un traitement au moment de la journée où son efficacité est maximale, et ses effets secondaires moindres.

Aujourd'hui, cette méthode est utilisée dans une quinzaine de centres de cancérologie dans le monde. Toutefois, elle reste approximative. Car, on le sait désormais, les rythmes circadiens varient selon les individus. Aussi la « fenêtre de tir » optimale n'est-elle pas forcément la même d'un patient à un autre. Comment tenir compte de ces différences ? En développant une approche personnalisée. Après de premières expériences prometteuses, nous ambitionnons d'y parvenir chez l'homme, d'ici à quelques années. Voici comment.

La chronothérapie des cancers, dont le concept est né dans les années 1980, va à l'encontre des principes de la chimiothérapie conventionnelle. Celle-ci suppose en effet que les cellules répondent aux traitements de manière aléatoire. Dès lors, peu importe l'heure du traitement, qui est par conséquent administré à des horaires définis par l'organisation des services de soins.

La chimiothérapie conventionnelle suppose également qu'une efficacité antitumorale maximale passe obligatoirement par une toxicité importante pour les cellules saines. Les médicaments sont donc dosés de manière à se rapprocher au maximum du seuil d'intolérance. Cela provoque de pénibles effets secondaires, comme des troubles digestifs, une baisse de l'immunité ou encore la perte des cheveux.

Mais la découverte de l'horloge circadienne a conduit à envisager les choses autrement. Ce système moléculaire, contrôlé par une quinzaine de gènes, rythme le métabolisme des cellules au cours de la journée. Il règle ainsi les oscillations de la température corporelle, des sécrétions hormonales, de l'activité physique et du repos, de l'appétit, de l'humeur ou encore de la perception de la douleur... Dès lors, il était logique de penser que les effets des médicaments pouvaient eux aussi varier selon le moment où ils étaient administrés. Avec quelques confrères, nous avons alors commencé à étudier ce qu'il en était, en réalisant des études de chronopharmacologie chez l'animal.

Dès la fin des années 1990, après plusieurs études de ce type, notre hypothèse s'est révélée exacte [2]. La toxicité de 40 agents anticancéreux d'utilisation courante variait de plus de 50 % selon l'heure d'administration d'une même dose. Il en allait de même pour l'efficacité antitumorale de 26 de ces médicaments. Mais ces études pharmacologiques ont surtout dévoilé

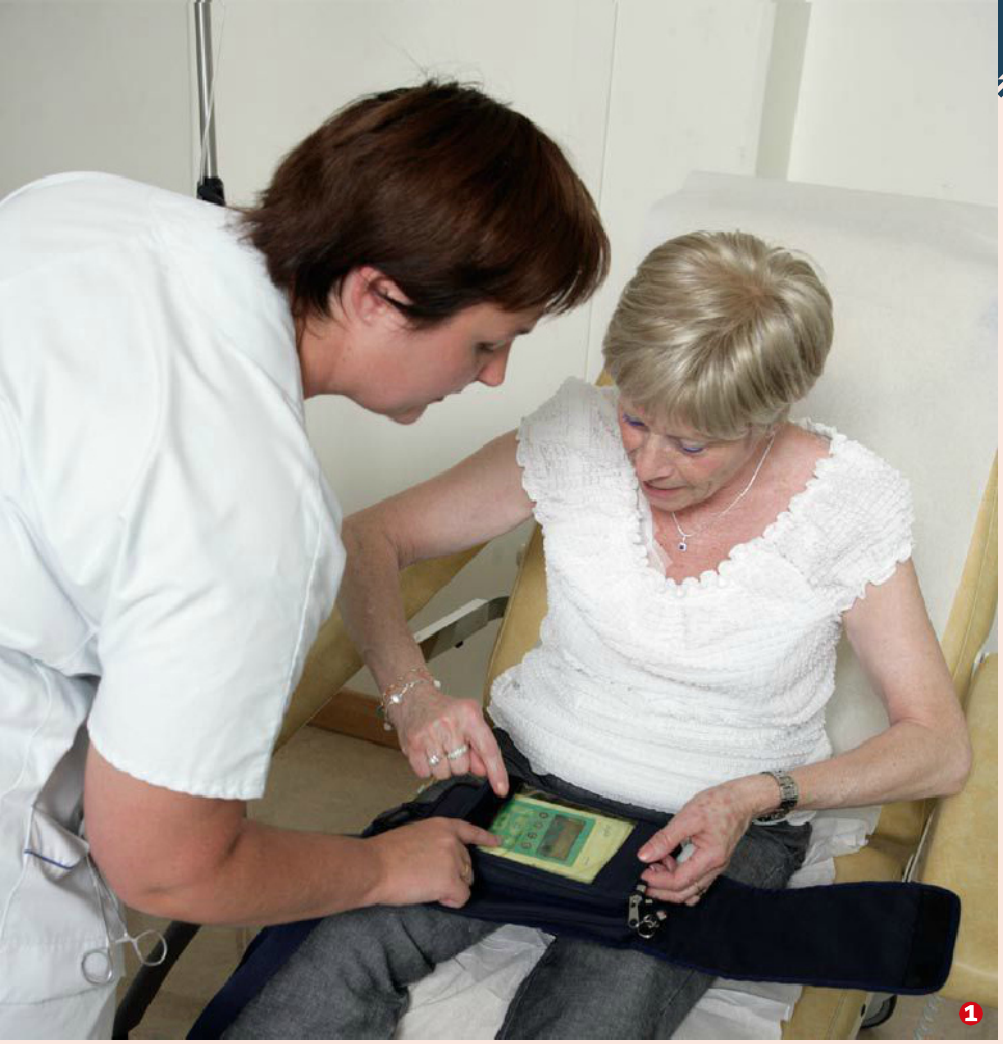
L'essentiel

> LA CHRONOTHÉRAPIE consiste à administrer un traitement au moment où son efficacité est maximale et ses effets secondaires moindres.

> AUJOURD'HUI, ce moment est évalué à partir de la moyenne des rythmes circadiens de dizaines d'individus.

> POUR ACCROÎTRE les performances de la chronothérapie, les médecins veulent désormais l'adapter aux particularités de l'horloge biologique de chaque patient.

© DÉPARTEMENT COMMUNICATION HÔPITAUX UNIVERSITAIRES PARIS-SUD/AP-HP



Une infirmière, à l'hôpital Paul-Brousse de Villejuif, explique à une patiente (1) comment utiliser le boîtier qui lui permettra de suivre sa chimiothérapie à domicile (2). Dans un sac, une pompe électronique, reliée à quatre poches de médicaments différents (3), a été programmée pour perfuser les doses voulues aux heures où le traitement est le plus efficace. © EMMANUEL VALENTIN

une heureuse coïncidence : l'heure de meilleure tolérance coïncide souvent avec l'heure de meilleure efficacité, tant pour les médicaments anticancéreux qui tuent les cellules que pour ceux qui en bloquent le fonctionnement.

Cellules saines préservées. Comment cela se fait-il ? Le recours à des modèles mathématiques nous a fourni une explication plausible. La plupart des médicaments anticancéreux ciblent les cellules qui prolifèrent, qu'elles soient cancéreuses (les cancers sont caractérisés par une prolifération anarchique) ou saines (dans ce dernier cas, la prolifération est limitée afin de régénérer les tissus, en particulier la peau, la muqueuse intestinale, le foie et les cellules sanguines).

Or les divisions cellulaires des cellules saines sont rythmées par l'horloge circadienne alors que, le plus souvent, les cellules cancéreuses s'affranchissent de ce rythme. Leur cycle de division est aussi dérégulé au point que, parfois, elles ne présentent plus de rythme du tout. Par conséquent, alors que les cellules saines sont moins sensibles aux traitements à certains moments de la journée, la sensibilité des cellules cancéreuses reste, elle, constante. Cela explique que l'heure de meilleure tolérance soit aussi celle de meilleure efficacité. D'autant plus que limiter la toxicité des médicaments vis-à-vis des cellules saines qui entourent la tumeur améliore une propriété de ces dernières : leur capacité à inhiber la prolifération tumorale.

Différentes expériences menées chez des rongeurs ont ensuite permis de déterminer les plages de traitement optimales en fonction de rythmes caractéristiques du système circadien. Par exemple, les fluctuations des taux de cortisol* et de mélatonine* au cours du jour et de la nuit, ou encore les rythmes d'activité physique. Puis, ces profils ont été extrapolés à l'homme, en se référant aux mêmes paramètres circadiens (rythmes d'activité physique, taux de cortisol et de mélatonine), faciles à mesurer.

Il s'agit de profils chronobiologiques moyens : ils résultent d'une moyenne sur plusieurs dizaines ou centaines d'individus, utilisée >>>

* **LE CORTISOL** est une hormone sécrétée par les glandes surrénales.

* **LA MÉLATONINE** est une hormone sécrétée par la glande pinéale, dans le cerveau.

Cancer : frapper au bon moment

>>> ensuite comme référence. Les malades sont équipés d'une pompe portable, qui perfuse automatiquement les médicaments voulus aux heures optimales préalablement définies, en partant du principe que le rythme de vie des patients est similaire, et que leur système circadien est robuste.

Cette approche de chronothérapie est utilisée essentiellement dans le cas de cancers du système digestif (côlon, rectum, pancréas), mais aussi du sein et du poumon. Elle est le plus souvent proposée à des patients qui tolèrent mal les traitements conventionnels ou qui y répondent peu. On y recourt aussi lorsqu'une efficacité maximale est recherchée, notamment pour favoriser l'éradication ultérieure des métastases par chirurgie.

Taux de survie augmenté. Comme l'ont montré les études de 1997 citées au début de cet article, les résultats peuvent être spectaculaires. En l'occurrence, les 278 patients atteints de cancer colorectal métastatique avaient été soumis à un protocole de chimiothérapie combinant trois médicaments. Alors que les uns étaient perfusés en continu, les autres bénéficiaient d'une chronothérapie. Chez ces derniers, le nombre de cas d'inflammation des muqueuses buccales a été divisé par cinq, le nombre de cas de détérioration des nerfs périphériques par deux, alors que l'efficacité antitumorale était doublée : ils ont été deux fois plus nombreux à voir leurs tumeurs métastatiques réduites au moins de moitié.

Mais surtout, la chronothérapie permet de sauver des vies. En 2012, l'analyse combinée (ou méta-analyse) des résultats de trois études cliniques internationales impliquant au total 842 patients atteints de cancer colorectal métastatique l'a prouvé [3]. Elle a montré que le taux de survie à cinq ans augmentait de 50 % après chronothérapie, chez les patients de sexe masculin, en comparaison d'une administration conventionnelle des mêmes médicaments : il atteignait 29 % au lieu de 18 %.

Tout indique cependant que ce résultat peut encore être considérablement amélioré. En effet, on sait que les rythmes biologiques diffèrent entre individus et selon le sexe. On peut donc s'attendre à une variation de l'heure optimale selon les personnes. En outre, le traitement et la maladie perturbant parfois l'horloge circadienne, cette heure optimale peut varier au cours des jours, des semaines ou des mois.

Une récente étude a confirmé cette hypothèse : elle a montré que la moitié des patients partageait l'heure optimale moyenne de traitement, tandis que l'autre moitié s'en éloignait de une à six heures, en plus ou en moins [4]. Dès lors, comment prévoir cette heure optimale chez un individu donné ?

Heure optimale détectée. Pour répondre à cette question, les projets européens Tempo et C5Sys, que j'ai coordonnés, ont associé la modélisation mathématique de la chronothérapie avec des études sur des cellules humaines en culture et des souris. Nous avons suivi le devenir dans l'organisme d'un anticancéreux largement utilisé pour soigner les cancers du côlon, l'irinotécan, en fonction des rythmes d'expression des gènes de l'horloge circadienne. Nous avons alors constaté que lorsque *Bmal1*, gène clé de l'horloge circadienne, est activé, l'irinotecan est plus rapidement bio-activé et tue davantage de cellules. Nous avons ensuite construit un modèle mathématique capable de prédire l'heure de moindre toxicité de l'irinotécan pour les cellules saines, à partir de l'enregistrement sur 24 heures des niveaux d'expression de *Bmal1* et d'un autre gène de l'horloge, *Rev-Erbα* [5].

Pour que ce modèle mathématique soit utilisable en routine, il faut parvenir à prédire l'heure optimale des traitements non plus à partir des rythmes d'expression de ces gènes, mais en fonction de paramètres physiologiques qui reflètent précisément l'état de l'horloge biologique, comme, notamment, la température corporelle. C'est l'un des objectifs du projet national PiCADo (Pilote pour le changement d'ampleur de la domomédecine), lancé en 2012 et qui regroupe une quinzaine de partenaires industriels ou académiques.

PiCADo enrôlera à terme 60 patients atteints de cancer digestif ou pulmonaire et soignés à domicile par chronothérapie. Ces patients seront équipés de capteurs de température et d'activité télécommunicants récemment mis au point. Ces données physiologiques seront transmises aux professionnels de santé par GPRS* et intégrées dans le dossier médical. Leur analyse permettra d'identifier les heures de traitement optimales adaptées à chaque individu. PiCADo devrait alors ouvrir la voie aux premières tentatives mondiales de chronothérapie personnalisée des cancers. Ainsi simplifiée grâce à l'usage des technologies de l'information et de la communication, l'administration des traitements selon les horloges biologiques devrait constituer une avancée importante dans la lutte contre le cancer. ■

*LE GPRS est une norme de téléphonie mobile dérivée du GSM et complémentaire de celui-ci, permettant un débit de données plus élevé.

[1] F. Lévi *et al.*, *Lancet, 350,* 681, 1997.
[2] F. Lévi, *Lancet Oncol., 2, 307,* 2001.
[3] S. Giacchetti *et al. Ann. Oncol., 23,* 3110, 2012.
[4] V.P. Roche *et al. Chronobiol. Int., 31,* 409, 2014.
[5] X.M. Li *et al., Cancer Res., 73,* 7176, 2013.

Travailler en horaires décalés, comme ces serveurs, dérègle l'horloge interne et entraîne des troubles du métabolisme.

4 • Quand perdre le rythme fait prendre du poids

Manger à pas d'heure, dormir peu ou travailler la nuit : ces comportements dérèglent nos horloges biologiques, favorisant diabète et obésité.

PAR **Anne Debroise,**
journaliste.

Travailler de nuit augmente-t-il les maladies du métabolisme, comme l'obésité et le diabète ? Aujourd'hui, impossible de se voiler la face : la réponse est oui. En 2011, une équipe de l'école de santé publique de l'université Harvard, aux États-Unis, a publié les résultats d'une étude menée sur plus de 200 000 infirmières américaines [1]. Celles qui n'avaient jamais travaillé en horaires décalés ne développaient pas plus de diabète de type 2 que l'ensemble de la population, avec 3 ou 4 nouveaux cas pour 1 000 personnes chaque année. Mais chez les autres, l'incidence du diabète augmentait avec le nombre d'années passées à travailler de nuit. Elle faisait plus que doubler chez les infirmières ayant suivi de tels rythmes pendant plus de vingt ans. Cette augmentation relativement modeste, mais réelle, était associée à un gain de poids, de 1 kilogramme en moyenne par période de cinq ans de travail de nuit. >>>

© JEAN HEINTZ/HEMIS.FR

Quand perdre le rythme fait prendre du poids

››› Le lien entre excès de poids et diabète est logique, puisque l'excès de poids, qui perturbe la sensibilité de l'organisme à l'insuline, est une des causes principales du diabète de type 2. Mais la démonstration que des horaires décalés favorisent l'apparition de ces pathologies est beaucoup plus novatrice. Pourquoi ce rythme de vie a-t-il un tel effet ? Probablement parce qu'il perturbe l'horloge circadienne : depuis quelques années, plusieurs études révèlent combien le métabolisme énergétique en dépend et à quel point il est modifié lorsqu'elle est déréglée.

« Il y a vingt ans, les liens entre le métabolisme des cellules et les rythmes circadiens étaient considérés comme une question ésotérique », se souvient Paolo Sassone-Corsi, directeur du centre d'épigénétique et du métabolisme à l'université de Californie. Pourtant, remarque Charna Dibner, du laboratoire d'endocrinologie circadienne à l'hôpital universitaire de Genève, en Suisse, *« intuitivement, on sait que de nombreuses fonctions cellulaires suivent un cycle circadien : quand nous dormons, le système digestif ne fonctionne pas comme dans la journée »*.

En fait, presque tous les processus métaboliques sont concernés. Par exemple, le taux sanguin de l'hormone qui stimule l'appétit, la ghréline, augmente avant l'heure habituelle des repas. Au même moment, les enzymes de la digestion sont sécrétées, les protéines impliquées dans le stockage des lipides et des glucides sont produites en grande quantité, l'intestin est animé de mouvements qui déplaceront les aliments. Après les repas, ces phénomènes se calment. La sécrétion d'insuline, l'hormone qui stimule l'utilisation du glucose sanguin par les cellules, augmente le matin et diminue la nuit. Il en est de même des enzymes qui, dans les muscles, assurent la production et la consommation d'énergie : elles foisonnent dans la journée, mais disparaissent le soir.

L'essentiel

> CONTRÔLÉ PAR L'HORLOGE CIRCADIENNE, le métabolisme énergétique est perturbé lorsque cette horloge est déréglée, par exemple par le travail de nuit.

> SUR LE LONG TERME, ces dysfonctionnements entraînent l'apparition de pathologies comme l'obésité et le diabète.

> DES TRAVAUX CHEZ LES SOURIS montrent que cela résulte principalement des horaires de prise de nourriture décalés.

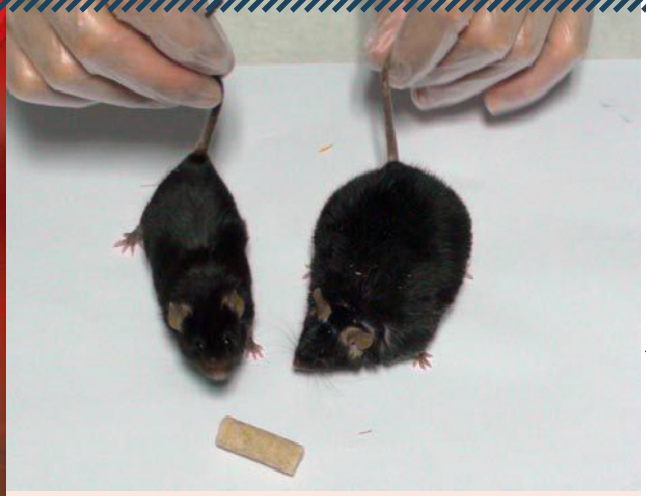
Dès lors, on pouvait supposer qu'une perturbation du rythme de vie, susceptible de modifier ces rythmes, pouvait avoir des répercussions sur la santé. Mais chez l'homme, il était et demeure impensable de l'étudier expérimentalement, en modifiant sciemment et durablement les rythmes de sommeil pour voir si cela déclenche des états métaboliques pathologiques. Et les études épidémiologiques menées chez les populations travaillant de nuit, ou touchées par des troubles du rythme circadien, ont leurs limites : des facteurs socio-économiques s'ajoutent aux éventuelles influences de l'éclairage, de la vie nocturne, de la composition et de l'heure des repas, ce qui empêche d'établir des liens de cause à effet irréfutables.

Heures des repas. Comme souvent, les biologistes ont donc dû recourir aux études chez l'animal. Or, leurs résultats se sont révélés troublants ! En 2010, Laura Fonken, de l'université de l'Ohio, aux États-Unis, a par exemple comparé l'évolution de deux groupes de souris sur huit semaines [2]. Toutes disposaient de seize heures d'éclairage par jour. Mais certaines bénéficiaient ensuite de huit heures d'obscurité totale, alors que d'autres restaient faiblement éclairées, avec une luminosité équivalente à celle d'un écran de télévision ou d'ordinateur. Comme les souris sont des animaux qui dorment le jour et sont actifs la nuit, cette situation n'est pas strictement équivalente à celle d'humains qui passeraient la nuit dans une pièce éclairée. En revanche, il s'agit bel et bien, pour ces animaux, d'une situation où l'alternance jour-nuit, et donc le rythme circadien, est bouleversée.

Que s'est-il passé ? Les souris privées d'une nuit totale se sont nourries à heures irrégulières, et en plus grande quantité, avec au final une prise de poids supérieure d'environ 50 % à celle des animaux ayant un rythme normal. Mais si on les contraignait à se nourrir aux mêmes heures que ces derniers, alors l'excès de prise de poids était aboli. Ce n'est donc pas tant l'éclairage artificiel de nuit qui perturbe le métabolisme de ces rongeurs, que ses conséquences sur le mode d'alimentation et l'heure des repas.

En 2012, l'équipe de Yasushi Noguchi, de la société Ajinomoto, au Japon, a confirmé l'importance de ces horaires en faisant « sauter le petit déjeuner » à des souris – ce qui consiste à les priver de nourriture au début de la nuit [3]. Au bout de quatre heures, elles étaient autorisées à se nourrir librement jusqu'au lever du jour. Cela, pendant quatre jours. Résultat : ces souris ont mangé davantage et ont pris plus de poids que leurs congénères s'alimentant selon un rythme

© HUBERT RAGUET/CNRS PHOTOTHÈQUE



© JULIEN DELEZIE & ÉTIENNE CHALLET/CNRS

Au Chronobiotron de Strasbourg, où lumière, température, pression atmosphérique… sont reproduites artificiellement (à gauche), une équipe a montré que des souris privées d'un gène d'horloge deviennent obèses alors qu'elles ont les mêmes conditions de vie et la même alimentation que les souris témoins (ci-dessus, à gauche).

naturel. Qui plus est, leur taux de cholestérol et de triglycérides dans le foie était plus élevé.

La tentation est grande d'extrapoler ce genre de résultats à l'homme. Mais les chronobiologistes se méfient. « *On voit bien que perturber le rythme naturel de ces animaux nocturnes perturbe leur métabolisme,* précise Étienne Challet, spécialiste des rythmes circadiens au CNRS, à l'université de Strasbourg. *Mais le rythme en question étant inversé par rapport à celui de l'homme, toute extrapolation directe est proscrite.* » Raison pour laquelle plusieurs groupes impliqués dans les recherches en chronobiologie, dont le sien, commencent à travailler avec un rat diurne africain, *Arvicanthis ansorgei*. Les premiers essais ont d'ores et déjà permis de constater que le décalage horaire provoque, chez cette espèce, des problèmes de régulation de la glycémie qui évoquent le diabète.

Gènes de l'horloge. Entre-temps, les recherches ont aussi progressé concernant les mécanismes cellulaires et moléculaires susceptibles d'expliquer le lien entre perturbation des rythmes et problèmes de métabolisme. On sait depuis plusieurs années qu'il existe, dans toutes les cellules, des gènes dits « de l'horloge » : ils contrôlent, selon un mode cyclique, le rythme d'expression d'une grande quantité d'autres gènes codant, par exemple, des enzymes et des hormones. Normalement, celles-ci sont donc produites suivant un rythme cyclique.

En 2010, le groupe de Joseph Bass, à l'université Northwestern de Chicago, aux États-Unis, a publié le résultat d'observations effectuées sur des souris dont plusieurs gènes de l'horloge avaient été inactivés [4]. Cela a non seulement perturbé le sommeil de ces animaux et provoqué des prises de nourriture irrégulières et excessives, mais il a aussi perturbé leur métabolisme. Les oscillations normalement observées dans l'expression de gènes impliqués dans le métabolisme du glucose et dans la synthèse de l'insuline ont été abolies. Conséquences : une déficience en insuline, un excès de lipides et de glucides dans le sang, et une accumulation de graisses dans le foie.

Comment une simple inactivation des gènes de l'horloge peut-elle engendrer une déstabilisation apparemment massive du métabolisme cellulaire ? En 2006, Paolo Sassone-Corsi a découvert que la protéine Clock, codée par l'un des principaux gènes d'horloge, n'agit pas seulement en régulant l'expression de quelques gènes bien précis. Elle a un second effet, beaucoup plus global, sur l'ADN. Le plus souvent, ce dernier est condensé, enroulé autour de protéines appelées histones. Or, Paolo Sassone-Corsi a découvert que Clock relâche cet enroulement, ce qui permet à la machinerie chargée de la transcription des gènes d'avoir accès à des pans entiers du génome. Il a également découvert qu'une autre protéine, nommée Sirt1, recondense l'ADN autour des histones. Si elles agissent de manière coordonnée, Clock et Sirt1 ont le potentiel d'imposer leur rythme à une grande partie du génome. Selon les tissus, entre 5 % et 50 % des gènes subiraient l'influence de ce métronome, qui donne le *tempo* de l'expression ou la non-expression de protéines importantes pour le métabolisme du glucose et des lipides dans le foie, la sécrétion d'insuline dans le pancréas, etc.

Comment fonctionne ce métronome ? L'activité de Clock étant fondamentalement réglée sur le

[1] A. Pan *et al.*, *PLoS Med.*, 8:e1001141, 2011.
[2] L.K. Fonken *et al.*, *PNAS, 107*, 18664, 2010.
[3] C.Yoshida *et al.*, *Nutrition & Metabolism, 9*, 78, 2012.
[4] B. Marcheva *et al.*, *Nature, 466*, 571, 2010.
[5] Y. Nakahata *et al.*, *Cell, 134*, 329, 2008.
[6] R. Salgado-Delgado *et al.*, *Endocrinology, 151*, 1019, 2010.
[7] F. Sheer *et al.*, *Int. J. Obes., 37*, 604, 2013.

Quand perdre le rythme fait prendre du poids

››› rythme circadien, il faut, pour que leurs actions soient synchronisées, que Sirt1 suive le même rythme, mais en décalé. Or, en 2008, l'équipe de Paolo Sassone-Corsi s'est rendu compte que l'action de Sirt1 dépend des apports alimentaires : cette protéine ne peut agir qu'en présence d'une autre molécule disponible uniquement lors des périodes de jeûne [5]. Chez l'homme, c'est donc quand l'organisme ne s'alimente plus, autrement dit la nuit, que Sirt1 peut condenser l'ADN que Clock a décondensé dans la journée. Les chronobiologistes ont ainsi mis le doigt sur le talon d'Achille de notre équilibre métabolique : si, par exemple, on mange la nuit, alors Clock et Sirt1 n'agissent plus en alternance, comme elles le devraient, et tout le métabolisme est perturbé.

« *L'identification de ces mécanismes intéresse beaucoup l'industrie pharmaceutique,* révèle Charna Dibner. *Certains laboratoires testent de petites molécules appelées "clock modulators" capables d'influencer le fonctionnement des horloges, en modulant leur expression, et donc peut-être d'agir sur les problèmes métaboliques. Pour l'instant, aucune n'est encore testée sur l'homme.* »

Approche comportementale. Sera-t-il nécessaire d'en arriver là ? Face aux approches médicamenteuses, il existe également des approches comportementales. En 2010, des chercheurs mexicains en ont fait le test chez des rats poussés à s'activer de jour (l'équivalent du travail de nuit pour l'homme) [6]. Comme ils s'y attendaient, ceux libres de s'alimenter quand ils le voulaient se sont mis à manger le jour et sont devenus obèses. Mais ceux contraints à des horaires normaux de prise de nourriture (autrement dit, pour ces animaux, uniquement la nuit) n'ont pas pris de poids.

De telles études ouvrent des perspectives thérapeutiques chez l'homme. En 2013, Frank Scheer de l'école de médecine de l'université Harvard a publié une étude réalisée en Espagne sur 420 personnes en surpoids [7]. Elles avaient suivi un programme de vingt semaines de régime de type méditerranéen, riche en fruits et légumes. La moitié des personnes ingurgitaient un repas principal (représentant 40 % de l'apport calorique quotidien) avant 15 heures, pendant que l'autre moitié se nourrissait plus tard. Les deux groupes assimilaient les mêmes aliments, dormaient autant et faisaient autant d'exercice physique. Mais ceux qui mangeaient plus tôt ont perdu plus de poids, et plus vite.

Avant d'envisager d'ingurgiter des médicaments de manière inconsidérée, ces études suggèrent donc de revenir, dans la mesure du possible, à des fondamentaux dont le rythme de vie moderne a tendance à nous éloigner : éviter les repas tardifs, limiter l'exposition à la lumière la nuit, et respecter des heures de coucher fixes et une durée de sommeil suffisante. ■

Sport, à la bonne heure

L'exercice physique est réputé lutter contre l'obésité et le diabète. Mais chez les rats, cela dépend de l'heure à laquelle il est pratiqué. Des chercheurs mexicains ont ainsi imposé à des rats de courir dans une roue aux heures où, habituellement, ils dorment (c'est-à-dire, pour ces animaux nocturnes, le jour). Ils ont observé que les concentrations sanguines de glucose et de lipides, se sont mises à osciller à un rythme inhabituel, ou alors ont cessé d'osciller. Après trois à quatre semaines de ce régime, les rats décalés ont commencé à prendre du poids [1]. **Et chez l'homme ? On sait que les performances sportives varient selon l'heure de la journée. Mais pour l'instant, rien ne dit que l'activité physique tardive a des effets néfastes.** [1] R.Salgado-Delgado *et al., Neuroscience, 154,* 922, 2008.

Pour en savoir plus

Livres

> Albert Goldbeter, *La Vie oscillatoire, au cœur des rythmes du vivant,* Odile Jacob, 2010.

> André Klarsfeld, *Les Horloges du vivant, comment elles rythment nos jours et nos nuits,* Odile Jacob, 2009.

Revue

> « Le temps biologique », *Biofutur, 325,* octobre 2011.

Sur le Web

> **https://future.arte.tv/fr/chronobiologie** Vivons-nous vraiment selon notre biorythme ?

> **http://tinyurl.com/Lecerveau-Chronobiologie** Le dossier « Chronobiologie » du site Le cerveau à tous les niveaux.

> **http://tinyurl.com/Inserm-dossier-chronobiologie** Dossier pédagogique de l'Inserm consacré à la chronobiologie.

> **http://tinyurl.com/Rythmes-circadiens-Douglas** Dossier pédagogique de l'institut canadien Douglas, sur les rythmes circadiens et les troubles afférents.

> **http://tinyurl.com/ChronotypeQuestionnaireMunich** Pour connaître votre chronotype et participer aux recherches dans ce domaine.

> **www.sf-chronobiologie.org** Le site de la société francophone de chronobiologie.

> **www.scoop.it/t/les-rythmes-biologiques-et-la-chronobiologie-dans-la-presse** Compilation d'articles et vidéos récents proposée par Claude Gronfier, chercheur au sein du département de chronobiologie de l'Inserm, à Lyon.

> **http://tinyurl.com/Russell-Foster-Conference-2013** Une heure trente de conférence par Russell Foster, spécialiste de la régulation de l'horloge biologique par la lumière (en anglais).

© PAOLO MARIA AIRENTI - FOTOLIA.COM

STOCKAGE D'ÉNERGIES

La clé de la transition énergétique

Le stockage d'électricité a toujours été nécessaire, pour les applications nomades ou pour équilibrer les réseaux, par exemple. Avec le développement des énergies renouvelables intermittentes, l'évolution des systèmes énergétiques et de la mobilité, il est devenu une pierre angulaire. Il permet de différer l'usage du surplus d'énergie produite notamment par les éoliennes ou le solaire pour l'utiliser au moment opportun, limitant voire évitant le recours à des énergies carbonées en période de surconsommation, mais également de proposer de nouveaux services pour l'exploitation des systèmes énergétiques.
Pour répondre à cet immense enjeu, tous les grands pays industrialisés investissent des sommes importantes dans la mise au point et l'installation de nouveaux systèmes de stockage. Il est question d'une centaine de milliards d'euros sur les dix années à venir.

La recherche explore ainsi une vaste panoplie de technologies permettant de transformer l'énergie électrique – non stockable telle quelle – pour la « mettre en conserve ». Il s'agit aussi bien de mettre au point des dispositifs de petites ou moyennes capacités, inférieures à quelques MW, pour les applications décentralisées, que des outils de stockage massifs, jusqu'à plusieurs GW. Les chercheurs font feu de tout bois pour répondre aux besoins très variés : amélioration des technologies classiques – batteries, stations de pompage hydraulique – ou mise au point de nouvelles technologies telles que le stockage par air comprimé, par volants d'inertie, par hydrogène voire par supercapacités.
Parallèlement, le stockage de chaleur constitue un second enjeu : il est indispensable pour économiser l'énergie mais intervient également comme complément des systèmes de stockage d'électricité par air comprimé. ■■

> P. 42 – LES ENJEUX
La nouvelle donne du stockage d'énergies

> P. 44 – LA RECHERCHE
Mille défis pour la recherche

> P. 46 – INNOVATION
De l'électricité dans le gaz ; Le stockage prend le volant…

Cahier réalisé en partenariat avec :

La nouvelle donne du stockage d'énergies

L'électricité dispose de nombreux atouts et, en particulier, celui d'émettre peu de CO_2 au moment de sa production lorsqu'elle est d'origine nucléaire ou produite à partir du vent, du soleil ou de l'eau. Mais, comparée aux hydrocarbures, elle souffre d'un désagréable inconvénient : on peut difficilement la stocker. Ou plutôt, pour être stockée, elle doit être généralement transformée, ce qui complique sérieusement la tâche.

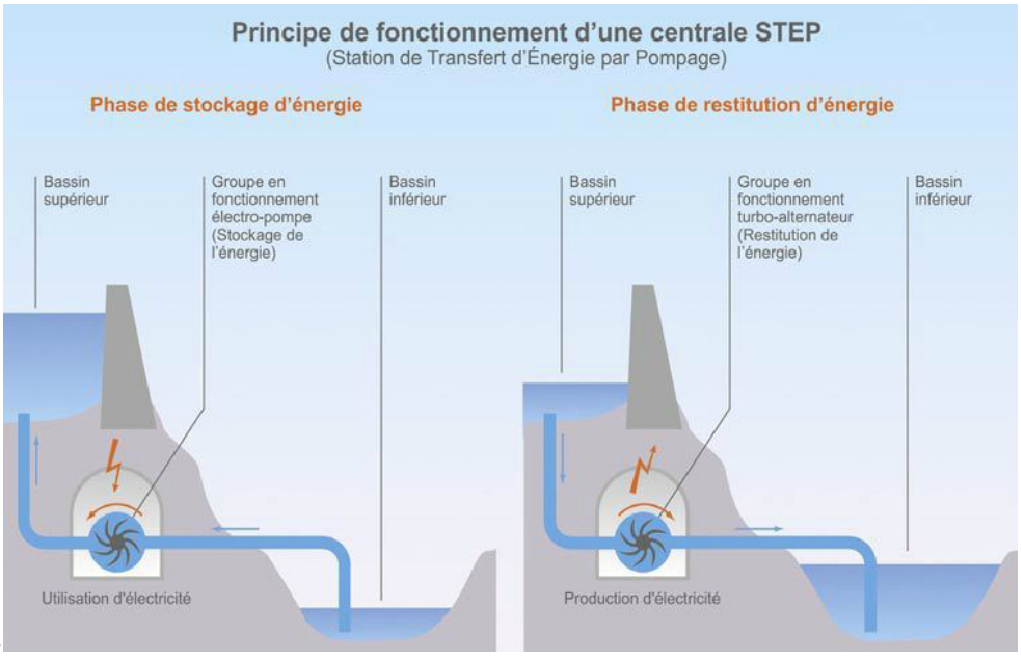
Les besoins de stockage d'électricité sont de deux ordres : stockage « décentralisé », pour des applications stationnaires (alimentation électrique de sites isolés ou de secours par exemple) ou mobiles (appareils autonomes, transports) ; stockage « massif » (ou « centralisé »), en particulier pour stocker de grandes quantités d'énergie produite, mais aussi pour lisser les pointes de demandes, pour fournir de l'énergie en cas de défaillance ou garantir une continuité de fourniture et de qualité de courant (cas, par exemple, d'une zone isolée avec des systèmes d'alimentation sans interruption). Dans le premier cas, il est question de puissances installées modérées ; dans le second, les capacités nécessaires s'étendent de 10 MW à des centaines de GW. Longtemps, deux technologies clés ont suffi à remplir ces besoins : les batteries d'un côté, les stations de transfert d'énergie par pompage (STEP) de l'autre. La technique des STEP est associée à l'énergie potentielle d'une masse d'eau. Elle consiste à pomper l'eau d'un bassin inférieur vers un bassin supérieur pendant les heures creuses (quand l'électricité est disponible à un coût compétitif). L'électricité est donc transformée en énergie potentielle et stockée sous forme gravitaire. Le système est réversible. En cas de besoin, le réservoir est vidé par gravité et l'eau produit de l'électricité par passage dans des turbines.

UNE VASTE PALETTE DE TECHNOLOGIES

En 2011, les STEP représentaient plus de 99 % des 140 GW de capacité de stockage installée dans le monde. La France compte six installations dont la plus grande, mise en service par EDF en 1985 sur le barrage de Grand'-Maison (Isère), offre une puissance de 1 420 MW pendant 172 heures. On peut souligner que la part du stockage d'électricité dans le mix électrique français est déjà significative (4,3 GW de STEP ou stations de transfert d'énergie par pompage, et 13 GW d'hydraulique avec réservoir).

L'évolution de la problématique énergétique et le développement des énergies renouvelables ces dernières années ont complètement changé la donne. D'un côté, la voiture électrique nécessite de nouvelles générations de batteries. Par ailleurs, les énergies éolienne et solaire ont la caractéristique d'avoir une production variable dans le temps et déconnectée de la demande. La production ne correspond pas nécessairement aux pointes de consommation. Faute de moyens de stockage performants – et très réactifs –, ce décalage peut poser problème, et réduire la part d'EnR intermittente conduirait à augmenter la part des sources d'énergie fortement carbonées (centrales à charbon, au fioul…). Une solution pour absorber les surplus de production d'origine renouvelable : le stockage lorsque la production dépasse la consommation. Les seuls besoins liés à ces énergies sont colossaux compte tenu des parcs désormais en place.

Bref, le développement des énergies renouvelables et la volonté de s'affranchir des combustibles fossiles ont fait du stockage d'électricité un enjeu majeur. Pas de nouvelle



© CONNAISSANCE DES ÉNERGIES

© AIRDIASOL-2009

Centrale hydroélectrique de Revin (Ardennes).

énergie efficace sans stockage approprié. On assiste ainsi à un feu d'artifice d'innovation dans le domaine.

Chercheurs et ingénieurs du monde entier mettent en œuvre tous les moyens à leur disposition pour transformer l'électricité de façon à la « mettre en conserve » le temps nécessaire. Rien n'est épargné. Côté électrochimie, la course pour améliorer les batteries bat son plein. L'électrolyse est également appelée à la rescousse pour la transformation de l'électricité en hydrogène. Hydrogène que l'on peut utiliser comme carburant ou en substitut partiel du gaz naturel (le « Power to Gas »). Le stockage par voie électrostatique est utilisé par les condensateurs et supercapacités. Côté mécanique, outre des nouveaux types de STEP, le stockage par air comprimé, connu sous son acronyme anglais CAES (Compressed Air Energy Storage) est mis en œuvre aussi bien pour le stockage massif que distribué. Pour les courtes demandes de puissance, on travaille également sur des volants d'inertie, qui conservent l'énergie sous forme cinétique, et sur les supercondensateurs, pour des capacités de 10 kW à 10 MW.

Cette vaste panoplie de moyens de stockage est indispensable pour couvrir les besoins extrêmement diversifiés des systèmes énergétiques de demain, chacun d'eux ayant ses atouts, ses limites et sa place spécifique dans un système électrique, en complémentarité avec les autres moyens de flexibilité (production de pointe, effacements, renforcements réseaux, écrêtement). À une extrémité les supercondensateurs offrent des temps de charge/décharge très courts, de l'ordre de la seconde, avec des puissances élevées. Pratique pour booster un autobus électrique au démarrage ou répondre à une demande de puissance instantanée sur un réseau. Toutefois leur capacité énergétique de stockage est limitée. À l'autre extrémité, les STEP peuvent stocker plusieurs GWh, ce qui permet d'engranger un surplus de production intermittente sur plusieurs heures, mais leur temps de décharge peut se compter en jours. Entre les deux, toutes les combinaisons de capacités et temps de décharge sont offertes par l'une ou l'autre des technologies. Le tout sans compter avec d'autres paramètres clés comme le délai d'activation (de moins d'une seconde à plus de 10 minutes), l'efficacité et bien évidemment… le coût de l'électricité produite (de 1 à plus de 4000 $ par kW, selon l'EPRI). Certains enfin, comme l'hydrogène, permettraient de transporter, via les infrastructures gazières existantes (réseaux de distribution et de transport), de grandes quantités d'énergie sur de longues périodes et d'augmenter les interactions entre réseau électrique et réseau de gaz. Cela explique la formidable course à laquelle se livrent tous les pays. On parle de 70 milliards de dollars d'investissement (étude Visiongain) voire 100 milliards d'euros (Pike Research) dans le monde sur la prochaine décennie. D'après Visiongain, en termes de capacité installée, la Chine (20 GW installés en 2012) prendrait la tête en 2022 avec 50 GW installés (soit +150 % sur 10 ans), devant les États-Unis (24,6 GW en 2012 ; 38,8 GW en 2022 : +55 %), l'actuel leader, le Japon (28,9 GW ; 34,1 GW : +20 %) et l'Allemagne (7,6 GW ; 15,8 GW : +110 %). La France ne se situerait en 2022 qu'au dixième rang mondial (10,7 GW installés) malgré un doublement de sa capacité actuelle de stockage. Ce ne sont évidemment que des estimations qui peuvent évoluer fortement au gré des contextes politiques et économiques. Ces chiffres toutefois signalent clairement l'importance du sujet du stockage.

STOCKAGE : LA CHALEUR AUSSI

Le stockage de l'électricité n'est pas le seul défi lié à l'énergie. Celui de la chaleur l'accompagne. Il s'agit avant tout, dans ce cas, d'économie d'énergie (stocker pour ne pas perdre la chaleur produite dans des périodes chaudes pour l'utiliser en périodes froides, jour/nuit, été/hiver…) en particulier en lien avec le chauffage des bâtiments, qui représente dans nos pays le plus gros poste de consommation d'énergie. Le stockage de chaleur joue également un rôle dans le cadre des énergies renouvelables pour accumuler l'énergie produite par les centrales solaires thermiques. Il est enfin l'une des composantes du stockage par air comprimé dit adiabatique *(voir page 44)*. Là aussi, de nombreuses technologies existent ou sont en développement. Elles se répartissent entre les dispositifs stockant la chaleur sensible (élévation de température d'un matériau gazeux, liquide ou solide), ceux qui stockent l'énergie sous forme de chaleur latente (énergie stockée par le changement d'état, fusion ou vaporisation d'un matériau et récupérée par le processus inverse) ou encore par des procédés plus complexes de stockage thermochimique et de sorption.

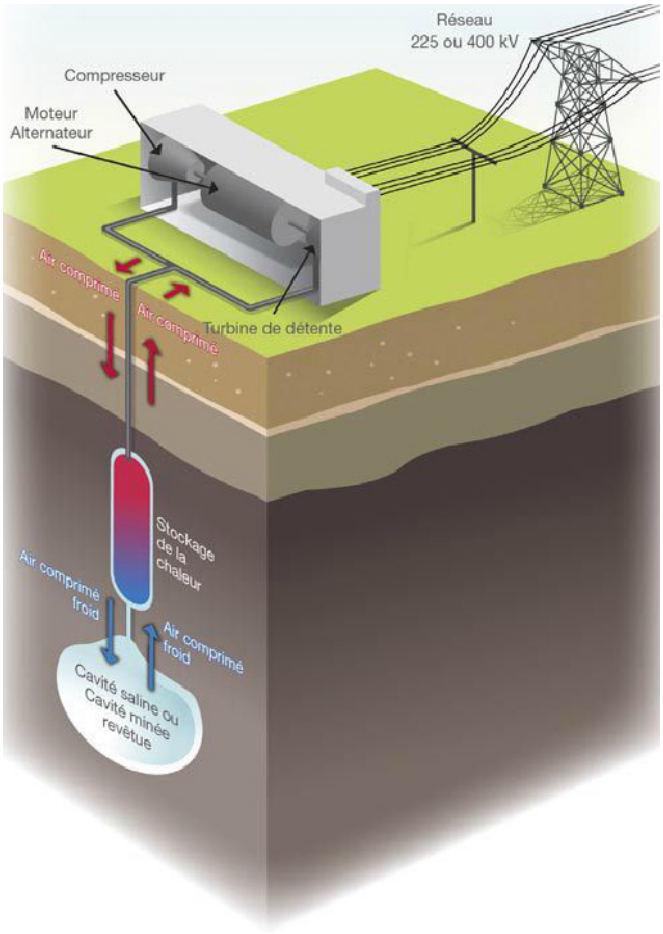
Mille défis pour la recherche

Outre l'amélioration des technologies existantes, la recherche explore de nouvelles voies de stockage. De nombreux démonstrateurs technologiques se mettent en place pour les valider, technologiquement et économiquement.

Les défis en matière de R&D pour le stockage d'énergie sont immenses. Vu les multiples procédés mis en œuvre, les verrous technologiques à lever sont très nombreux et variés. Ils portent aussi bien sur les matériaux que sur l'amélioration du rendement du système, la réduction de l'autodécharge, des pertes et des coûts, l'étude ou la conception de sites (surface ou souterrains) propices aux installations, l'étude et la minimisation des impacts sur l'environnement, etc. Dans le monde, tous les acteurs du stockage s'y consacrent. En France, de nombreux acteurs sont concernés par cette thématique, dont EDF, GDF SUEZ, Poweo, IFP Energies nouvelles, le CEA (en particulier via le Liten), le BRGM, et d'autres encore parmi les constructeurs d'équipements de stockage (comme ALSTOM, SAFT, MCPHY, etc…). Selon les technologies s'y ajoutent de nombreux laboratoires tels que Promes (CNRS, énergie solaire) ou encore, concernant les batteries, le Réseau sur le stockage électrochimique de l'énergie (RS2E). Ce dernier regroupe pas moins de 15 laboratoires, inclut différents organismes de recherche ainsi qu'une quinzaine d'industriels qui y participent. L'ANR soutient plusieurs grands projets ainsi que l'ADEME. Et la liste est loin d'être exhaustive.

Les STEP – qui stockent l'énergie par pompage depuis un bassin inférieur vers un bassin plus élevé – sont une technologie mature. Elles continuent néanmoins à susciter des recherches pour offrir de nouvelles possibilités et limiter les inconvénients. Les nouvelles technologies de pompes à vitesse variables (qui deviennent la norme) ont permis d'étendre le spectre d'utilisation des STEP qui ne se limitent plus à une exploitation binaire. Mais le problème du manque de sites adaptés reste entier. Les meilleurs, en montagne généralement, sont déjà utilisés… On songe ainsi, comme EDF, à utiliser la mer comme bassin inférieur et à pomper l'eau au niveau d'une falaise pour réaliser, en Guadeloupe, une STEP d'une puissance installée de 50 MW et d'un temps de réponse inférieur à 10 secondes. Ce projet d'un montant de 290 millions d'euros est financé à hauteur de 60 millions d'euros au travers d'un appel à manifestation d'intérêt de l'ADEME mais également au travers des fonds FEDER. Une telle installation existe au Japon. GDF SUEZ, pour sa part, étudie l'opportunité de réaliser des STEP souterraines. Autre évolution souhaitée : diminuer le temps de réaction des STEP pour les adapter au stockage d'énergie intermittente. Des études sur la mise au point de micro-STEP ont aussi été réalisées dans le cadre d'un projet ADEME. Enfin, des travaux restent indispensables pour continuer à optimiser les pompes, les turbines et diminuer les pertes de charge dans les conduites.

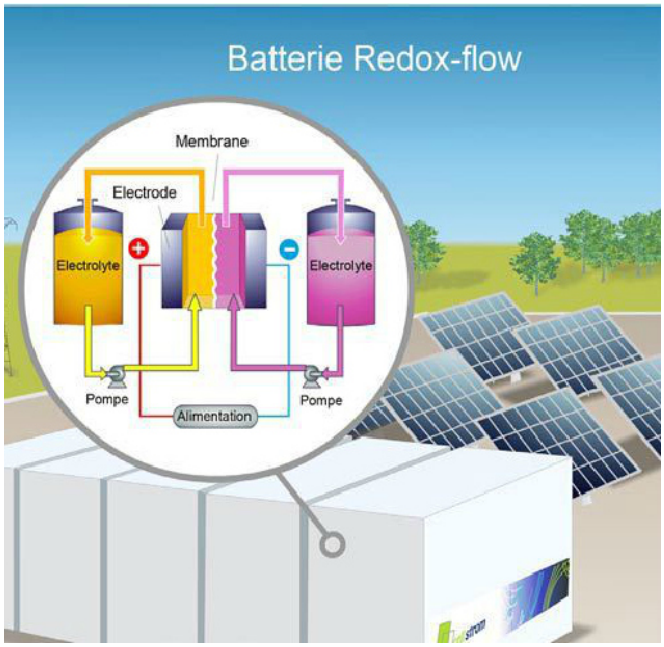
Stockage Adiabatique d'énergie par air comprimé.
Une rupture technologique dans le stockage de masse d'électricité.



© GAYACOM.FR

CAP SUR LES CAES ADIABATIQUES

Le stockage par air comprimé (CAES) est, lui, un procédé émergent. De nombreuses technologies sont explorées, que ce soit pour le stockage souterrain ou en surface. Le stockage souterrain fait l'objet d'intenses travaux, et il existe aujourd'hui deux installations opérationnelles : l'une en Allemagne, l'autre aux États-Unis. Elles stockent l'air comprimé entre 40 et 75 bars dans une cavité souterraine saline de quelques centaines de milliers de mètres cubes. Les deux sites existants peuvent restituer des puissances respectivement de 110 et 290 MW. Dans ces systèmes de première génération, la grande quantité de chaleur générée lors de la compression de l'air est perdue, et il faut en outre réchauffer l'air comprimé lors de sa récupération pour le faire passer dans la turbine qui produit l'électricité. Cette contrainte a motivé la recherche et le développement dans des solutions de valorisation ou de stockage, à moyenne ou haute températures, de la chaleur générée lors de la compression d'air. Une première approche consiste à utiliser la chaleur en sortie des turbines pour réchauffer l'air comprimé. Mais le *nec plus*



© ILLUSTRATION CORINNE BEURTEY/CEA

POUR EN SAVOIR PLUS

L'ATEE (Association technique énergie environnement) rassemble tous les acteurs concernés par les questions énergétiques et environnementales (petites et grandes entreprises, sociétés de service, organismes publics, collectivités territoriales, universités…). L'association a publié en 2013, avec l'ADEME et la DGCIS, une étude qui évalue le potentiel du stockage d'énergies pour la France métropolitaine et les DOM-TOM à l'horizon 2030 et identifie les filières technologiques les plus pertinentes d'un point de vue économique. Prochaine étape, en concertation avec les membres du Club Stockage d'énergies : le lancement d'un complément d'étude prenant cette fois en compte le périmètre Europe avec un scénario d'EnR renforcées dans le mix énergétique global.
www.atee.fr/

ultra serait un CAES dit adiabatique. L'idée est de stocker les deux énergies – thermique et mécanique – dans deux réservoirs spécifiques. La chaleur nécessaire pour réchauffer l'air comprimé pour sa détente est alors apportée par cette réserve. Un grand projet européen, Adele, qui vise une capacité de 360 MW, est en cours en Allemagne. En France, le projet ANR SEARCH (Stockage d'Électricité par Air comprimé avec Récupération de la Chaleur de compression), regroupant GDF SUEZ, Saint-Gobain, le CEA et Armines, associe de même un système de stockage de chaleur sensible à celui d'air comprimé avec la construction d'un pilote de stockage thermique de 600°C et 30 bars. Atout de ces systèmes adiabatiques : leur rendement pourrait dépasser les 70 % contre 50 % seulement pour un CAES sans récupération de chaleur. En 2011, la cartographie des technologies de stockage d'électricité, selon la puissance *versus* le temps de restitution de l'énergie stockée, présentait un manque pour la gamme de puissance de 1 MW à 50 MW et pour des temps de restitution de l'énergie allant d'une à plusieurs heures. Le concept de CAES, grâce à une adaptation des compresseurs et des turbines, est une réponse à ce besoin technologique. D'où les nombreuses recherches pour identifier de nouveaux sites et… mettre au point des sites de stockage en surface, des micros CAES adiabatiques, d'une capacité de quelques dizaines de MW. Plusieurs voies sont explorées. Aux États-Unis, un pilote de 1,5 MW existe. En France, Storewatt travaille, avec Fives notamment, à un démonstrateur basé sur sa propre technologie *(voir page 46)*. IFP Energies nouvelles également a choisi d'étudier ce type de procédé.

BATTERIES : AU-DELÀ DU LI-ION

D'autres voies de stockage thermodynamique sont aussi explorées : le stockage par liquéfaction d'air, celui d'électricité par un stockage combiné de chaleur et de froid avec transferts thermiques par cycle fermé d'argon et, enfin, la transformation d'électricité en chaleur sensible stockée dans des matériaux à haute température puis restituée lorsqu'un besoin de production électrique apparaît. Ce dernier procédé breveté par Saipem fait l'objet d'un programme ANR, Sether, réunissant à l'origine Poweo, Saipem, CEA, l'Onera, le CNAM Paris et Armines.

Autre Graal du stockage : les batteries. Au-delà du lithium ion, qui tient la corde dans les applications mobiles, de très nombreux couples d'électrodes, de types de membranes et d'électrolytes sont explorés. Impossible de les citer tous. Entre les batteries sodium soufre, sodium ion, lithium air, métal liquide… ils sont légion. On retiendra cependant la surprenante longévité des batteries au plomb-acide, toujours sauvées d'une mort annoncée par leur coût minimal, et les promesses des batteries à circulation d'électrolyte, dites batteries « redox flow ». Une recherche menée par le CEA fait d'ailleurs la synthèse de ces deux approches. Son accumulateur au plomb-acide méthane sulfonique à circulation d'électrolyte est une alternative à la batterie au plomb-acide sulfurique pour toutes les applications de stockage liées aux installations photovoltaïques, par exemple.

RÉCUPÉRER LA CHALEUR FATALE

Côté stockage de la chaleur, enfin, les principaux axes de recherche portent sur les matériaux : nouveaux matériaux, augmentation de la durée de vie, amélioration des propriétés thermophysiques… Pour progresser, le stockage thermochimique fait lui encore l'objet de recherches de base. D'autres pistes sont également en cours d'investigation, notamment à IFP Energies nouvelles, pour récupérer et utiliser directement la chaleur fatale industrielle ou pour la transformer en électricité, avec ou sans stockage associé. Mais au-delà de la technologie, la question première qui se pose, c'est la validité économique de tous ces systèmes, question abordée dans une récente feuille de route de l'ADEME et à laquelle les nombreux démonstrateurs en développement contribueront à apporter une réponse. Il est clair qu'à ce jour, tout procédé supplémentaire à installer en plus des éoliennes et des centrales solaires n'est pas compétitif. ■

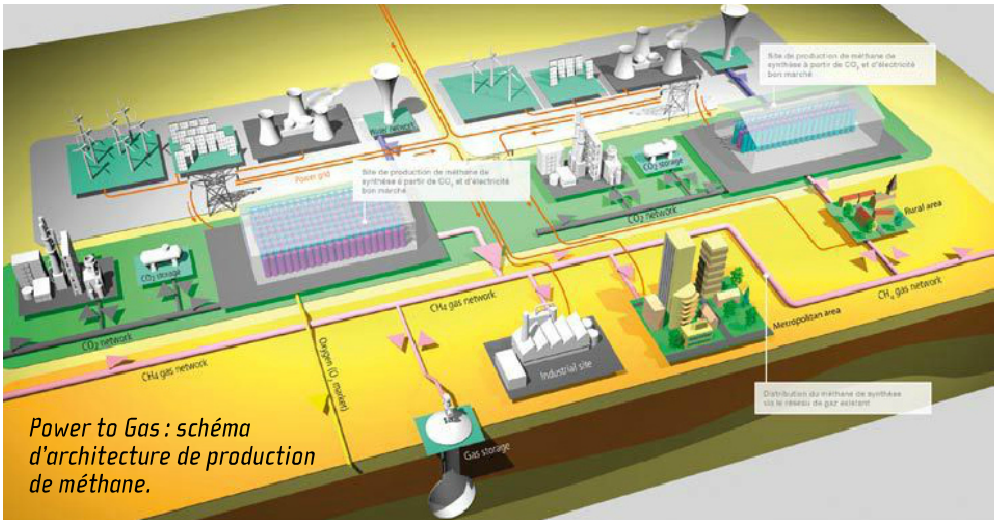
FILIÈRE HYDROGÈNE

De l'électricité dans le gaz

L'électricité surnuméraire, des éoliennes par exemple, peut être transformée par électrolyse en hydrogène et donc stockée. On parle alors de stockage d'énergie. Diverses utilisations peuvent être faites de cet hydrogène. Il peut, par exemple, être mélangé, jusqu'à plusieurs pourcents, à du gaz naturel pour fournir de l'énergie. Cette filière, dite «Power to Gas», fonctionne à Dunkerque dans le cadre d'un grand projet de démonstration, GRHYD, piloté par GDF SUEZ, soutenu par l'ADEME et financé par les Investissements d'avenir. Deux usages différents de l'hydrogène seront mis en œuvre dans la communauté urbaine de Dunkerque.

Le premier consiste en l'injection d'hydrogène dans un réseau de gaz naturel. Objectif : alimenter 200 logements neufs d'un nouveau quartier de la communauté urbaine de Dunkerque pour le chauffage, la cuisson et la production d'eau chaude. Seconde application : le mélange gaz naturel-hydrogène donne naissance à un carburant baptisé Hythane®. Dans le cadre de GRHYD ce carburant sera utilisé pour alimenter une flotte d'autobus fonctionnant actuellement au gaz naturel. Outre la valorisation de l'électricité produite par l'éolien ou le photovoltaïque, dans les deux cas l'apport d'hydrogène contribuera à diminuer les émissions de CO_2 du territoire puisqu'il s'agit d'un hydrogène issu d'électricité décarbonnée.

Le programme GRHYD qui a été lancé l'an dernier est de grande ampleur : 5 ans, 15 M€. Il ne réunit pas moins d'une douzaine de partenaires autour de GDF SUEZ parmi lesquels la Communauté urbaine de Dunkerque, son exploitant de bus (STDE), GrDF, GNVert, Cofely-Ineo, Areva Hydrogène et Stockage de l'énergie, le CEA, McPhy Energy, l'Ineris, le CETIAT et CETH$_2$. De son côté, GRTgaz va lancer d'ici à 2017 un démonstrateur de «Power to Gas» d'une capacité de production de 1 MWh d'hydrogène injecté dans le réseau de transport, avec une extension ultérieure de production et l'injection de méthane de synthèse (méthanation).



Power to Gas : schéma d'architecture de production de méthane.

© GAYACOM.FR

AIR COMPRIMÉ

Un démonstrateur pour le stockage en surface

Claude Favy a mis au point et breveté un procédé innovant pour stocker, dans des usines en surface, l'énergie électrique sous forme d'air comprimé. Après avoir créé sa société Storewatt en 2011, il a approché le groupe Fives pour industrialiser cette technologie baptisée Nerialis. Dans le cadre d'un appel à projet de l'ADEME, Fives et Storewatt se sont associés avec Air Liquide et Armines au sein d'un consortium pour un programme de recherche. Ce projet, partiellement financé dans le cadre des Investissements d'avenir par des subventions et avances remboursables, doit permettre de mettre au point un démonstrateur à l'horizon 2015-2016. Ce démonstrateur a notamment pour objet de faire la preuve des performances du système pour convaincre les énergéticiens, qui seront les clients, de s'y intéresser.

L'objectif industriel de Fives est de proposer à terme des centrales d'une capacité comprise entre 20 et 100 MW, capables d'offrir entre 5 et 10 heures de stockage.

Ce procédé de stockage de masse fournit l'énergie au niveau des postes sources des exploitants et se destine avant tout aux gestionnaires de réseaux électriques. Avec la puissance qu'il offre, il leur permet en particulier d'offrir davantage de flexibilité à leurs réseaux en lissant la charge. Il permet également la régulation de fréquence primaire : lorsque la fréquence du courant baisse par suite d'un défaut d'une unité de production, le dispositif détecte cette baisse de fréquence et injecte de la puissance pour la compenser. Il se destine également aux applications d'équilibrage de réseau électrique dans les zones insulaires.

STOCKAGE DE FAIBLE CAPACITÉ

Le stockage prend le volant

© LEVISYS, CIRTEM

Prototype d'un volant d'inertie.

Les volants d'inertie constituent une solution de stockage de petite capacité flexible et réactive particulièrement attrayante. Afin de booster cette technologie, en juillet dernier, a débuté, sous l'égide de l'ADEME, un important programme : Flyprod. Deux objectifs complémentaires pour ce projet. Le premier vise à optimiser la conception d'un volant d'inertie à sustentation passive mis au point par les partenaires industriels du projet. Il s'agit, en utilisant notamment des matériaux standards, en intégrant la pompe à vide et un système de résistance sismique, d'augmenter le rendement de ce volant, d'en réduire le coût et d'améliorer sa fiabilité. L'objectif est de mettre au point des volants d'une capacité de 40 kW contre 10 kW actuellement. Deuxième ambition : concevoir, déployer et exploiter une ligne pilote de production de ces volants d'inertie d'une puissance de 40kW. Cette ligne, qui sera installée au sein de la technopole de l'Aube près de Troyes, devrait atteindre à terme une cadence de production de 100 appareils par an, soit une capacité de régulation de 4 MW. Enfin, le but ultime de ce projet est la construction d'une usine susceptible d'accueillir une production annuelle de 20 MW. Ce programme, d'une durée de 3,5 années et d'un montant de 14,6 millions d'euros est un partenariat public-privé associant le Commissariat général des investissements (CGI) avec le soutien de l'ADEME et du conseil régional de l'Aube ainsi que des entreprises (Levisys, Cofely Ineo, CIRTEM) et l'Université de technologie de Troyes.

PHOTOVOLTAÏQUE ET BATTERIES

Un smart grid pour les îles

Contrairement aux grands réseaux électriques interconnectés, les réseaux installés dans les îles sont particulièrement fragiles à cause de leur petite taille. Les risques de déséquilibre entre offre et demande d'électricité y sont ainsi beaucoup plus élevés qu'ailleurs. D'où le vaste projet Millener – 30,5 millions d'euros sur cinq ans – conduit par EDF. Il a commencé en janvier 2011. Le but est d'expérimenter en Corse, en Guadeloupe et à la Réunion, auprès de 1 500 clients résidentiels un réseau intelligent (smart grid). Pour sécuriser et fiabiliser le réseau électrique, le consortium expérimentera différentes solutions de gestion de l'énergie couplées à des dispositifs de production photovoltaïques et de stockage. En outre, des services dédiés, tel que le suivi de la consommation en temps réel, devraient permettre d'influer sur la maîtrise de la demande d'énergie des clients résidentiels des îles, notamment en période de fortes contraintes. Millener installera ainsi 3 MWh de stockage sous forme de batteries Li-ion sur 500 sites résidentiels apportant 2,2 MW de support ; 1,7 GW de production photovoltaïque sera réparti sur les 500 sites et 1 000 « Énergie Box » déployées sur des sites résidentiels représentant 1 MW de flexibilité. En Corse, l'effacement diffus sera notamment assuré par le chauffage durant l'hiver, tandis que pour la Guadeloupe et la Réunion, les climatiseurs seront les appareils électriques ciblés. Les différentes consommations électriques de ces installations seront agrégées et pilotées par des dispatchings locaux. Les partenaires industriels du programme Millener sont Delta Dore, BPL Global, Edelia, Saft, Schneider Electric et Sunzil.

©EDF

Cahier spécial réalisé avec le soutien et la collaboration de l'ADEME (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie), du Club Stockage d'énergies de l'ATEE (Association technique énergie environnement), de IFP Energies nouvelles et de GDF SUEZ/ Remerciements iconographiques : Connaissance des énergies, CEA/Rédaction : Franck Barnu / Conception graphique et réalisation : Anoir,

Canada : la recherche fondamentale menacée

Le Parti conservateur au pouvoir est plus préoccupé d'accroître l'exploitation des ressources naturelles du pays que d'en mesurer les conséquences environnementales et sanitaires.

PAR **Dominique Forget,**
journaliste à *Québec Science*.

Aux abords de Mont-Joli, une bourgade de 7 000 habitants aux portes de la Gaspésie, à 350 kilomètres au nord de la ville de Québec, le fleuve Saint-Laurent est si vaste que les habitants l'appellent « la mer ». Claude Rouleau a contemplé maintes fois ses eaux glaciales en se rendant au travail, mais il s'en fait une image moins poétique que les touristes qui s'attardent sur la rive. Cet expert en science environnementale marine a passé des années à documenter l'impact sur les poissons, les mollusques ou les crustacés de polluants déversés dans le fleuve. Il est l'un des plus grands spécialistes canadiens en toxicologie marine. Et pourtant.

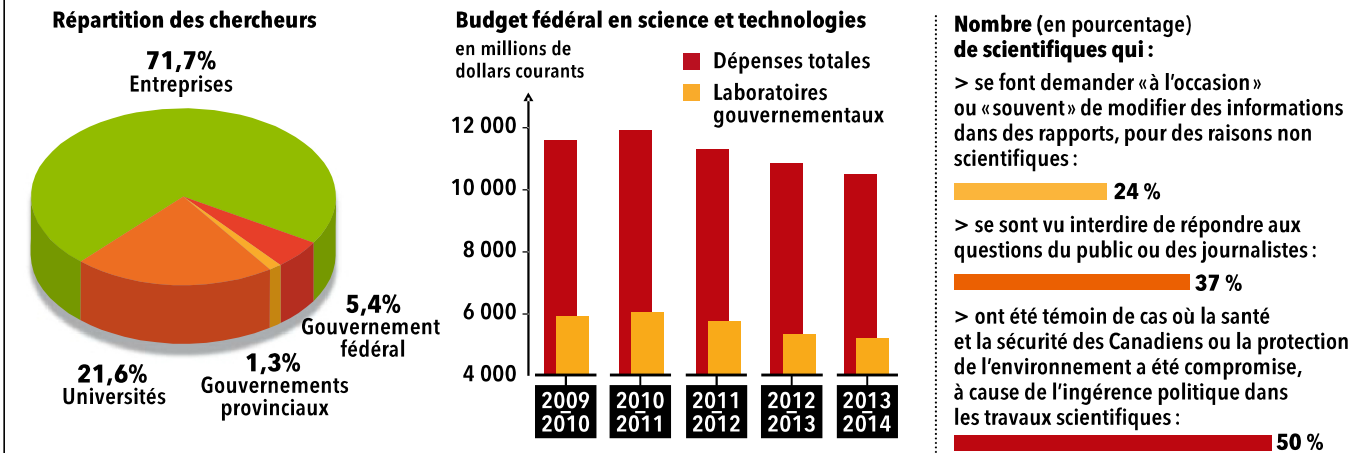
En décembre 2013, alors qu'il était au sommet de sa carrière, cet homme de 55 ans a été poussé à la retraite par son employeur, le gouvernement canadien. L'Institut Maurice-Lamontagne, centre de recherche de 400 employés relevant du ministère Pêches et Océans Canada, a en effet fermé son service d'écotoxicologie. « *Si les polluants industriels ont un impact sur la faune marine, Stephen Harper ne veut pas le savoir* », dénonce le chercheur, qui travaille maintenant comme bénévole à l'institut des sciences de la mer, affilié à l'université du Québec à Rimouski.

Depuis l'arrivée au pouvoir du Premier ministre conservateur Stephen Harper, en 2006, on ne compte plus les scientifiques au service du gouvernement canadien qui ont ainsi perdu leur emploi ou qui ont été contraints de réorienter leurs recherches. Ceux qui restent sont privés du droit de communiquer librement aux journalistes les résultats de leurs études, surtout lorsqu'elles braquent les projecteurs sur les dommages à l'environnement causés par l'exploitation des ressources naturelles.

La grogne est telle qu'à l'été 2012, et à nouveau à l'automne 2013, quelques milliers de scientifiques, vêtus de leur

© FRED GREENSLADE / REUTERS

Fig.1 La recherche canadienne en chiffres



LE GOUVERNEMENT FÉDÉRAL emploie 5,4% des chercheurs du pays. Il a réduit, depuis l'exercice 2010-2011, le budget attribué à leurs activités. Son ingérence dans la vie scientifique est réelle, comme en témoigne un sondage réalisé en 2013.

© INFOGRAPHIE : BRUNO BOURGEOIS

Le Premier ministre Stephen Harper annonce en août 2012 la seconde phase de financement de l'assainissement du lac Winnipeg. Ce lac a reçu en 2013 le titre de « lac menacé de l'année », décerné par l'organisation Global Nature Fund.

blouse blanche et pancartes à la main, sont descendus dans les rues d'Ottawa, la capitale, et de plusieurs autres villes canadiennes pour dénoncer ce que certains appellent la « *guerre du gouvernement Harper contre la science* ». Dans un pays comme le Canada qui n'a guère la culture des manifestations, l'image n'était pas anodine. « *Ça ne s'était jamais vu,* commente Yves Gingras, historien et sociologue des sciences à l'université du Québec à Montréal. *Nos scientifiques sont généralement invisibles sur la place publique.* »

Les trois piliers de la recherche. Au Canada, rappelle l'historien, la recherche repose sur trois piliers : la recherche universitaire, la recherche industrielle et la recherche gouvernementale [fig. 1]. La première est surtout guidée par la curiosité intellectuelle. Elle est soutenue par des organismes subventionneurs (des agences de moyens), et les chercheurs ou les professeurs qui décrochent ces financements ont normalement les coudées franches. La deuxième se mène au sein de l'entreprise privée. Quant à la recherche gouvernementale, elle doit servir l'intérêt public. Les scientifiques qui travaillent dans des laboratoires gouvernementaux veillent à la protection de l'environnement ou de la santé des Canadiens, par exemple. C'est à ce troisième pilier que s'attaque Stephen Harper.

« *Il y a toujours eu une sorte d'entente tacite entre les scientifiques du gouvernement et les politiciens* », explique Chris Turner, journaliste à Calgary, en Alberta, qui vient de publier *Science on coupe !* [1]. « *Les scientifiques collectent et analysent les données ; les politiciens se fondent sur les meilleures preuves scientifiques pour légiférer. Ce contrat social n'a pas toujours été parfaitement honoré, mais il n'a jamais été entièrement renié non plus. Du moins jusqu'à présent.* »

Car Stephen Harper, dénonce le journaliste qui a déjà fait campagne pour le Parti vert du Canada, fait la sourde oreille. « *Notre Premier ministre veut que le Canada devienne le pays le plus attrayant du monde pour l'investissement dans l'exploitation des ressources naturelles. En privant les scientifiques du gouvernement des moyens de faire leur travail, il souhaite nous empêcher de prendre conscience du véritable coût de sa politique.* » >>>

L'essentiel

> LA RECHERCHE gouvernementale canadienne a pour rôle de fournir des données, notamment en matière d'environnement et de santé, pour que le gouvernement prenne des décisions éclairées.

> LE GOUVERNEMENT conservateur en place depuis 2006 a d'abord interdit à ses scientifiques de parler aux médias sans autorisation.

> DEPUIS 2011, la baisse du budget a entraîné la fermeture de centres de recherche gouvernementaux, et les financements sont orientés vers la « mise en valeur » des ressources du pays.

Canada : la recherche fondamentale menacée

››› Le chef du Parti conservateur a affiché son mépris de la science dès son arrivée au pouvoir, en nommant Gary Goodyear au poste de ministre d'État des Sciences et de la Technologie. Nouvellement élu, ce politicien, un chiropraticien qui a fait quelques études en biomécanique, a d'abord refusé de dire aux journalistes s'il reconnaissait ou non la théorie de l'évolution. Puis il s'est ravisé… en prenant pour exemple l'évolution des espadrilles et des talons hauts !

Communication verrouillée. C'est toutefois seulement à partir de 2008 que Claude Rouleau a commencé à sentir l'étau se resserrer autour de ses activités à l'Institut Maurice-Lamontagne. À l'époque, le gouvernement de Stephen Harper adopte un protocole selon lequel tout scientifique employé par le gouvernement canadien doit, avant d'accorder un entretien à la presse, obtenir l'approbation du service des communications de son ministère, et même éventuellement l'accord du cabinet du Premier ministre. *« Quand nos résultats ne faisaient pas ombrage à l'image d'un Canada protecteur de la nature, on finissait généralement par obtenir l'autorisation, mais le processus était tellement long que le journaliste avait déjà écrit son article »*, raconte l'écotoxicologue.

Tous les journalistes qui tentent d'obtenir des informations auprès d'un scientifique du gouvernement canadien ont désormais droit à ce traitement. Quand Tom Spears, du quotidien *Ottawa Citizen*, a voulu écrire un article inoffensif sur les tempêtes de neige et qu'il s'est intéressé à une étude menée conjointement par la NASA et Environnement Canada, il a décroché un entretien auprès des Américains en quelques minutes, mais il n'a jamais réussi à s'entretenir avec les chercheurs canadiens. Le cas est devenu célèbre. Car grâce à la loi sur l'accès à l'information (qui permet aux citoyens d'accéder à tout document qui relève du gouvernement), le journaliste a appris que sa demande était passée entre les mains de 11 chargés de communication ! *« C'est le règne de la paranoïa »*, commente Chris Turner.

Puis Stephen Harper s'est attaqué directement à la recherche publique en 2010, en abolissant l'obligation pour les Canadiens de répondre au questionnaire long du recensement national, dont les données servent à orienter les politiques sociales (le questionnaire court, qui ne compte que huit questions, demeure obligatoire). La décision a provoqué la démission du statisticien en chef. Dorénavant, la quasi-totalité des rapports produits par Statistique Canada sont précédés d'un avertissement expliquant que l'organisation décline toute responsabilité quant à la fiabilité des données.

Sciences du climat. Mais c'est après les élections de mai 2011 que les visées de Stephen Harper deviennent évidentes. Le Parti conservateur remporte la majorité au parlement, obtenant la liberté de faire adopter ses lois sans opposition. Et dès 2012, le gouvernement adopte le projet de loi C-38, de plus de 400 pages. Officiellement, il s'agit de mettre en œuvre des mesures budgétaires. En réalité, on signe l'arrêt de mort de nombreux centres de recherche, laboratoires ou programmes scientifiques. La Fondation canadienne pour les sciences du climat et de l'atmosphère (FCSCA), qui finance des projets de recherche sur les changements climatiques, se fait couper les vivres.

Dans le haut Arctique, à quelque 800 kilomètres du pôle Nord magnétique, la petite station de recherche Pearl (acronyme anglais pour « laboratoire de recherche atmosphérique en environnement arctique »), à partir de laquelle on avait détecté un trou d'une ampleur sans précédent dans la couche d'ozone en 2011,

Bibliothèques attaquées

© DR

Sur cette photographie qui a fait le tour des réseaux sociaux, en janvier dernier, plusieurs centaines de livres et revues savantes sont entassés au fond d'un conteneur à déchets. C'est l'œuvre de Pêches et Océans Canada, qui a fermé cette année sept de ses onze bibliothèques scientifiques. *« On nous a dit que tous les documents éliminés seraient accessibles en ligne, mais c'est loin d'être le cas »*, dénonce Jennifer Hubbard, professeure en histoire des sciences à l'université Ryerson de Toronto, qui a tenté de retrouver sur Internet des documents censés avoir été numérisés. En vain. Un nombre incalculable d'ouvrages de littérature grise (des documents diffusés en dehors du circuit commercial) aurait été perdu, dont des rapports scientifiques, des cartes anciennes ou des inventaires d'espèces marines, certains datant du XIXe siècle. Même si tout était numérisé, rien ne pourrait remplacer le papier, estiment des scientifiques. *« Les membres du gouvernement canadien ignorent le fonctionnement d'une bibliothèque,* ironise le spécialiste des eaux douces David Schindler. *Quand on a accès à des livres sur des rayons, on peut butiner et tomber sur des documents insoupçonnés. De là peuvent naître des idées de recherche. »* Selon les calculs du gouvernement, fermer ces bibliothèques dégagerait une économie annuelle de 400 000 dollars canadiens (environ 260 000 euros). *« Des broutilles ! »*, peste David Schindler.

Des manifestants se mobilisent pour défendre la science devant le Parlement fédéral à Ottawa le 16 septembre 2013, dans un pays peu habitué à ce genre de rassemblement. © CHRIS WATTIE / REUTERS

est forcée de cesser temporairement ses activités. Elle dépendait du financement de la FSCSA. La fermeture de cette fenêtre sur le climat dans le Grand Nord n'empêche pourtant pas Stephen Harper d'annoncer l'inauguration, pour 2017, d'une toute nouvelle station de recherche dans l'Arctique, située celle-là à Cambridge Bay, à 1800 kilomètres au sud de Pearl. Cette future base doit permettre la *« mise en valeur des ressources de l'Arctique »*, peut-on lire sur une page du site internet du gouvernement.

En 2014, pour une raison qui demeure obscure – peut-être pour verdir son image au moment où il tente de faire approuver par les États-Unis son projet de pipeline Keystone XL, qui permettrait d'acheminer vers les États-Unis du pétrole extrait des sables bitumineux de l'Alberta – le gouvernement canadien décide *in extremis* de sauver Pearl. *« On a perdu une année de données,* déplore le spécialiste en sciences de l'atmosphère Jim Drummond, qui a fondé Pearl en 2005. *Le gouvernement a injecté des fonds par le truchement d'un nouveau programme, pour cinq ans. Après, on ne sait pas. »*

Ted Sheperd, expert en modélisation climatique, n'a pas la patience de vivre avec une telle incertitude. Après vingt-quatre ans passés à l'université de Toronto, il a quitté son poste de professeur pour rejoindre l'université de Reading, en Angleterre. *« Même pour les chercheurs universitaires, la vie est devenue plus difficile au Canada,* commente-t-il. *Les nouveaux fonds octroyés par les organismes subventionnaires sont assortis de conditions de plus en plus nombreuses. On favorise la recherche ayant des applications industrielles. »*

Retombées commerciales. Les organismes subventionnaires, qui reçoivent leurs fonds du gouvernement, peuvent attribuer en toute indépendance leur budget de base aux chercheurs universitaires les plus méritants. Ces dernières années, le gouvernement canadien leur a octroyé des fonds supplémentaires, mais toujours dans le cadre de programmes spéciaux, généralement pour financer des recherches à retombées commerciales. *« Dans un pays qui a renié sa signature du protocole de Kyoto, la recherche sur le climat n'a plus la cote »*, observe Ted Sheperd.

Le projet de loi C-38, officiellement devenu la loi sur l'emploi, la croissance et la prospérité durable, a modifié dans son sillage 60 lois canadiennes. La portée de la loi sur les pêches, par exemple, a été resserrée. Autrefois, elle interdisait la destruction de l'habitat du poisson, peu importe l'espèce. Désormais, elle ne protège plus que les espèces qui représentent une valeur pour la pêche commerciale ou récréative. Quant à la loi canadienne sur l'évaluation environnementale, elle a été réécrite de manière à réduire le nombre de projets soumis à une évaluation de leurs impacts environnementaux. Du coup, 2 970 évaluations environnementales en cours au Canada – concernant notamment la construction de pipelines ou d'installations utiles à l'exploitation des sables bitumineux – ont été stoppées parce qu'elles n'étaient plus requises.

« Et dire que le gouvernement canadien a déjà été un leader de la recherche en science environnementale », soupire l'écologiste à la retraite David Schindler, qui a passé la majeure partie de sa carrière comme chercheur au service de Pêches et Océans Canada. Dans les années 1970 et 1980, ce spécialiste des eaux douces a identifié la cause de la mort massive de poissons dans le grand lac Érié : les pluies acides. C'est aussi lui qui, le premier, a documenté l'impact des phosphates sur les écosystèmes lacustres. La région des lacs expérimentaux, le centre de recherche où il a mené ses études, a perdu son financement du gouvernement fédéral à la suite de l'adoption du projet de loi C-38.

« Les défis environnementaux sont immenses et le gouvernement fédéral sabote systématiquement sa capacité à voir venir les dégâts et à résoudre les crises », déplore David Schindler, qui est allé jusqu'en commission parlementaire pour dénoncer le projet de loi C-38, sans trouver une oreille attentive chez les conservateurs. *« Les Canadiens se croyaient à l'abri lorsque, sous George W. Bush, des scientifiques du gouvernement américain étaient forcés de réorienter leurs recherches pour des raisons politiques. Comme nous nous sommes trompés ! De leaders, nous sommes devenus cancres »*, conclut-il. ■

[1] C. Turner, *Science on coupe ! Chercheurs muselés et aveuglement volontaire : bienvenue au Canada de Stephen Harper,* Les éditions du Boréal, 2014.

Pour en savoir plus

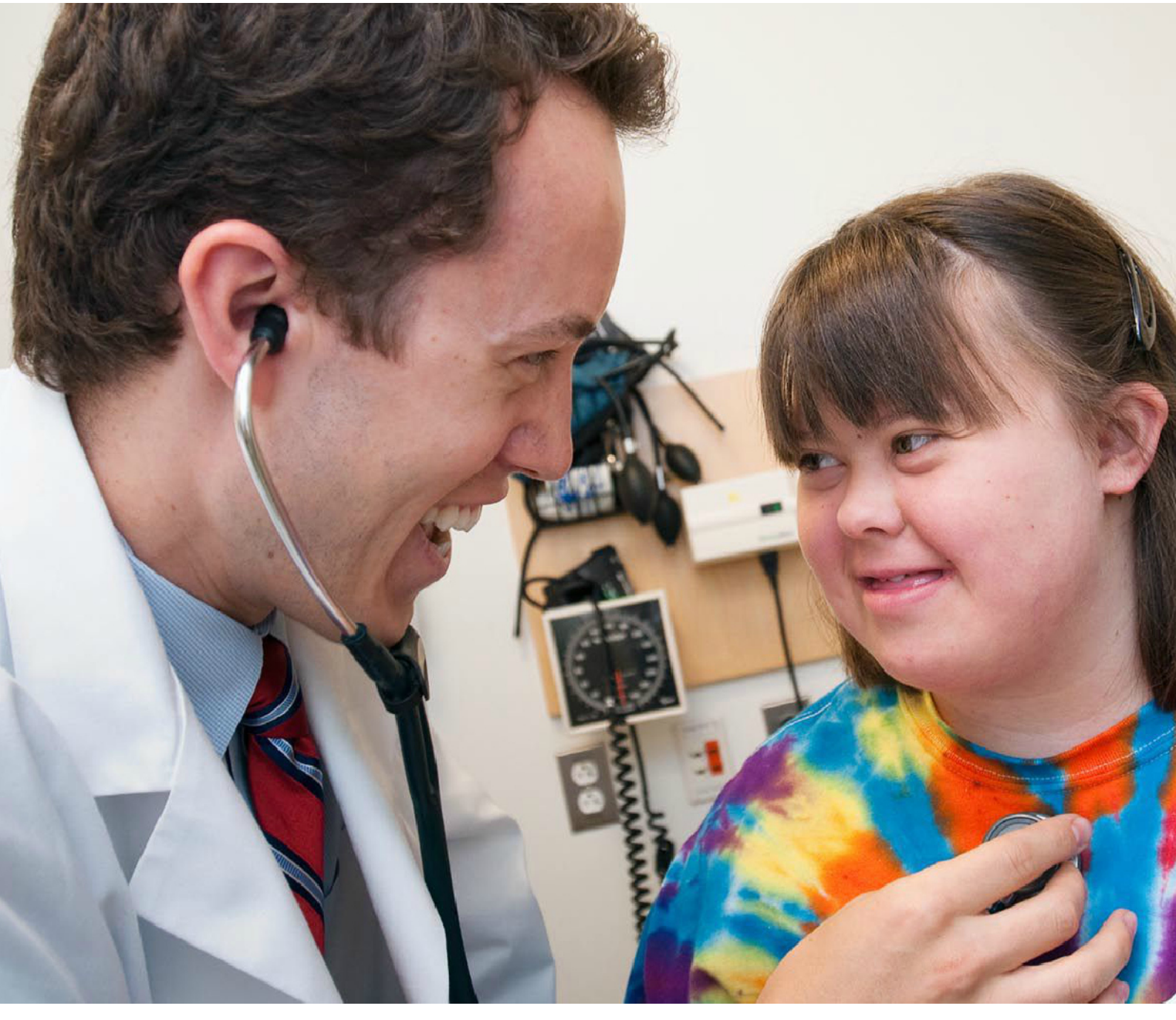
> **https://evidencefordemocracy.ca**
> **http://bit.ly/pipsc_science**

Peut-on soigner la triso

Des personnes trisomiques testent actuellement des médicaments destinés à améliorer leurs capacités cognitives. Parallèlement, des biologistes étudient les possibilités d'inactiver leur chromosome supplémentaire.

PAR **Emily Underwood,**
journaliste. Cet article est publié avec l'autorisation de l'AAAS. Il est paru en anglais dans *Science, 343,* 967. Il a été traduit par Antoine Cappelle.

Brian Skotko était encore à l'école primaire la première fois qu'il a pris la défense d'une personne trisomique : sa sœur cadette Kristin. « *J'étais en première ligne pour voir ce que c'est que grandir avec un chromosome en plus* », dit-il. Avec le temps, ce souci fraternel s'est développé en curiosité intellectuelle. Brian Skotko est devenu généticien médical. Il dirige aujourd'hui le pro-



mie 21 ?

gramme sur la trisomie à l'Hôpital général du Massachusetts, à Boston, aux États-Unis. Et il espère faire mentir l'une des hypothèses les plus répandues sur cette pathologie : que ses symptômes cognitifs sont permanents et trop complexes pour être traités avec des médicaments.

Ce printemps, Brian Skotko, avec plusieurs confrères, lance deux essais importants de médicaments destinés à réduire le handicap intellectuel des personnes trisomiques. L'un cible un composé chimique dont la concentration est élevée dans le sang de celles-ci et des personnes atteintes de la maladie d'Alzheimer, et qui endommagerait le cerveau. L'autre vise un système neurotransmetteur inhibiteur, qui freinerait l'activité cérébrale des trisomiques. Les deux essais font face à des défis inhabituels, comme le fait de recruter suffisamment de personnes et d'obtenir leur consentement éclairé. Mais si les médicaments fonctionnent, ils permettront à ces personnes, qui vivent de plus en plus longtemps grâce à des traitements améliorés des symptômes physiques de la maladie, de mener des vies plus indépendantes.

Parallèlement, plusieurs laboratoires poursuivent une approche plus radicale : attaquer la trisomie à sa racine. L'une des stratégies consiste à ramener le développement fœtal du cerveau sur une voie normale ; une autre s'attaque à la cause génétique, en désactivant la copie supplémentaire du chromosome 21. La perspective de traiter la trisomie dès le plus jeune âge, voire *in utero*, reste lointaine, mais pas inatteignable, selon plusieurs biologistes.

Gène supplémentaire. Dans la plupart des cas, la trisomie survient quand les deux copies du chromosome 21, le plus petit chromosome humain, ne se séparent pas convenablement lors de la formation des spermatozoïdes ou des ovules, ou au cours de leur union. Une fois fertilisé, l'œuf se retrouve avec trois copies, au lieu de deux, dans chaque cellule. Les scientifiques pensent que ce chromosome en plus génère une dose supplémentaire des produits de ses centaines de gènes, qui altèrent l'équilibre délicat des protéines et d'autres molécules dans le corps.

Au milieu du XX^{e} siècle, la plupart des enfants trisomiques mouraient encore avant l'adolescence d'un des multiples problèmes de santé qui accompagnent fréquemment la maladie, tels que des anomalies cardiaques congénitales, des déficiences immunitaires ou des leucémies. Aujourd'hui, de nombreuses personnes atteintes vivent sexagénaires, grâce à des avancées médicales telles que les antibiotiques ou le remplacement chirurgical de valve cardiaque [fig. 1]. En outre, des changements spectaculaires ont aussi eu lieu dans la façon dont la société traite aujourd'hui les trisomiques aux États-Unis et dans d'autres pays. Ceux-ci ont en effet acquis des droits aussi fondamentaux que ceux d'aller à l'école, d'avoir un emploi et d'être protégés contre les mauvais traitements ou la discrimination.

Ces améliorations n'ont toutefois pas été accompagnées de progrès dans le traitement des déficiences de quotient intellectuel, de langage, d'apprentissage et de mémoire. C'est pourtant ce qu'attendent désormais impatiemment les familles. C'est le cas d'Elaine Chaisson, mère de Brian, 22 ans, trisomique, dans le Massachusetts, aux États-Unis. Brian Chaisson, également aveugle, a été le premier >>>

L'essentiel

- **LES PERSONNES TRISOMIQUES** vivent de plus en plus âgées et dans de meilleures conditions.
- **DES MÉDECINS** testent des traitements permettant de réduire les effets du chromosome surnuméraire.
- **DES BIOLOGISTES** étudient des thérapies précoces qui rétabliraient une croissance cérébrale normale chez les trisomiques.

Brian Skotko, à l'hôpital général du Massachusetts, aux États-Unis, a lancé deux essais de médicaments destinés à améliorer l'état cognitif et le vieillissement de personnes atteintes de trisomie 21, telle Kayla Flinkstrom.

© MASSACHUSETTS GENERAL HOSPITAL

Peut-on soigner la trisomie 21 ?

›››› adolescent handicapé physiquement et mentalement autorisé à s'inscrire au lycée public local. Obtenir l'aide dont il avait besoin a été épuisant, et cela n'a pas été facile socialement pour lui, explique sa mère.

Quand ils ont entendu parler des essais médicaux menés par Brian Skotko, les Chaisson ont sauté sur l'occasion. Brian Chaisson est l'un des 24 patients à prendre part au plus petit de ces deux essais. Il teste un composé appelé « ELND005 », ou « scyllo-inositol ».

Alcool de sucre. Des chercheurs avaient d'abord remarqué, dans des essais sur des animaux et sur des cultures cellulaires, que ELND005, un alcool de sucre dérivé de plantes telles que le cocotier, détruit les plaques de bêta-amyloïde qui s'accumulent dans le cerveau des malades d'Alzheimer. Des tests supplémentaires de l'entreprise de biotechnologie Elan, basée à Dublin, en Irlande, ont révélé qu'il diminue aussi la concentration d'une petite molécule, le myo-inositol, associé à la formation des plaques et aux troubles cognitifs.

Or, la concentration de myo-inositol est généralement élevée dans le cerveau des personnes trisomiques, en particulier dans l'hippocampe, région essentielle pour la mémoire et l'apprentissage. Autour de 40 ans, environ 75 % ont développé des plaques et une démence semblables à celles que l'on rencontre dans la maladie d'Alzheimer. On suppose que c'est parce qu'ils possèdent trois exemplaires du gène de la protéine précurseur de l'amyloïde sur le chromosome 21, au lieu de deux. Bien que ELND005 ne soit pas censé annuler les anomalies du développement cérébral typiques de la trisomie, Elan suggère qu'en réduisant le myo-inositol, le médicament favorisera la communication entre les neurones et préviendra la formation des plaques.

L'essai en cours mesurera seulement les effets à court terme du médicament sur les capacités de Brian Chaisson à apprendre, à mémoriser et à parler, mais les Chaisson espèrent que cela aidera aussi leur fils à éviter une future démence. Bien qu'il ait toujours des difficultés avec certains aspects de l'essai, comme les prises de sang, la décision de s'y inscrire a été prise par son fils, indique Elaine Chaisson. *« Brian sait qu'il a des problèmes et voudrait simplement s'en débarrasser »*, précise-t-elle.

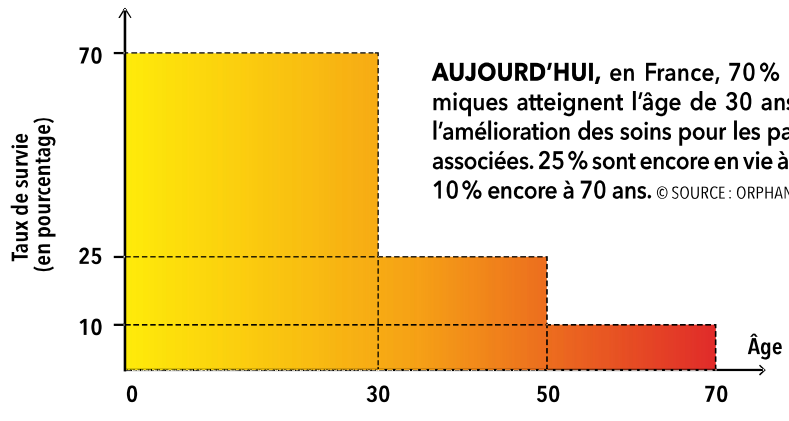
Bien que la famille Chaisson soit particulièrement intéressée par cet essai clinique par peur de la maladie d'Alzheimer, la mère de Brian espère également faire participer son fils au second essai, beaucoup plus vaste, qui commencera dans les prochains mois. Cet essai de phase II*, sponsorisé par la compagnie pharmaceutique suisse Hoffmann-La Roche, recrutera 180 jeunes adultes et adolescents trisomiques à travers le monde.

Excès d'inhibition. Ces patients testeront un composé appelé « RG1662 », qui cible les déficits de mémoire attribués à un déséquilibre des activités inhibitrice et excitatrice dans le cerveau. Au début des années 2000, William Mobley, alors à l'université Stanford, aux États-Unis, et ses collègues ont remarqué que des souris dotées d'une troisième copie de gènes similaires à ceux concernés par la trisomie avaient un excès d'activité cérébrale inhibitrice. Celle-ci semblait gêner la capacité des rongeurs à apprendre. Craig Garner, aussi de l'université Stanford, compare cette situation à la conduite d'une voiture dont le frein à main resterait serré. Le problème semblait particulièrement aigu dans l'hippocampe, où les souvenirs sont traités et stockés.

William Mobley s'est alors demandé si l'on pourrait desserrer ce frein à main en bloquant l'activité du GABA, principal neurotransmetteur inhibiteur du cerveau. Il a appliqué sur des tranches d'hippocampe vivant de souris trisomiques, de la picrotoxine, composé cristallin végétal toxique empêchant le GABA de se lier à une classe de récepteurs* appelés GABAA. La picrotoxine normalise effectivement l'activité électrique du cerveau, mais elle serait trop dangereuse comme médicament, car elle provoque des crises d'épilepsie.

Craig Garner a alors commencé à administrer aux souris trisomiques

Fig.1 La durée de vie des trisomiques en France

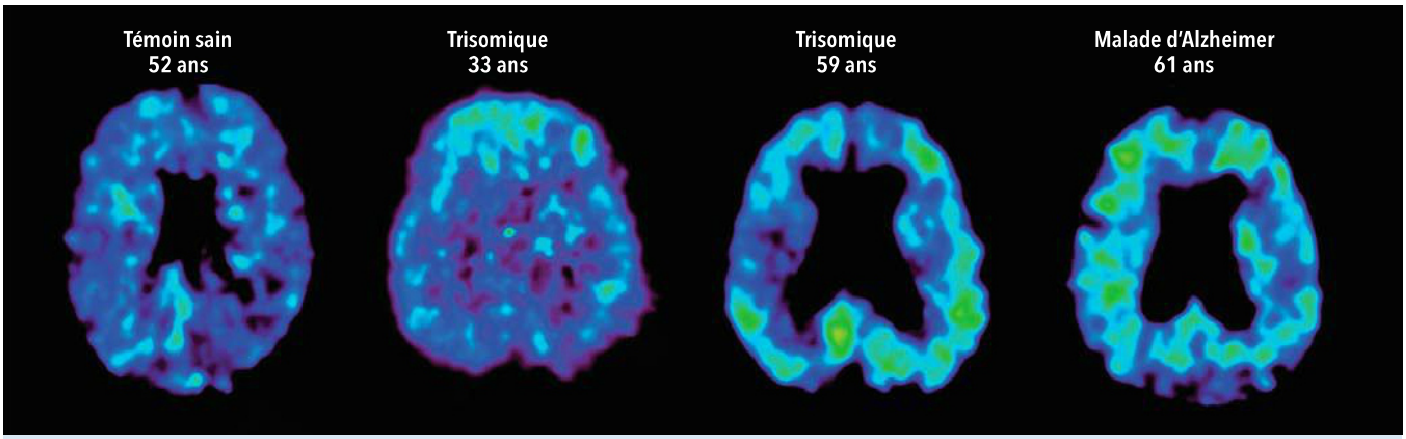


AUJOURD'HUI, en France, 70 % des trisomiques atteignent l'âge de 30 ans, grâce à l'amélioration des soins pour les pathologies associées. 25 % sont encore en vie à 50 ans, et 10 % encore à 70 ans. © SOURCE : ORPHANET.FR

* **UN ESSAI CLINIQUE DE PHASE II** étudie l'efficacité d'un médicament et sa dose optimale chez un nombre restreint de malades.

* **UN RÉCEPTEUR** est une protéine qui réagit à une stimulation chimique ou physique externe à la cellule (une autre molécule par exemple) et induit chez elle une réponse.

* **UN ESSAI CLINIQUE DE PHASE I** étudie l'éventuelle toxicité d'un médicament et son devenir dans l'organisme.



Sur ces clichés de cerveaux en tomographie par émission de positrons, les zones en vert indiquent la présence de plaques amyloïdes et d'enchevêtrements neurofibrillaires, caractéristiques de la maladie d'Alzheimer. Ces structures se développent tôt chez les trisomiques, et les plus âgés sont autant atteints que les malades d'Alzheimer. © UCLA

d'autres médicaments, plus sûrs, bloquant le GABA. En 2007, avec ses collègues, il a rapporté que plusieurs composés, dont le PTZ, un stimulant respiratoire et circulatoire, réduisaient fortement les déficits d'apprentissage et de mémorisation des rongeurs. Toutefois, le PTZ, qui avait été utilisé dans le passé pour traiter les problèmes de mémoire, avait été retiré du marché en 1982 par l'agence américaine des produits alimentaires et des médicaments (FDA), à cause d'inquiétudes sur son efficacité et sa sûreté : comme la picrotoxine, le PTZ entraînait des crises d'épilepsie.

Fort de ces découvertes, Michael Harpold, président du conseil scientifique de la Fondation pour la recherche et le traitement de la trisomie qui avait financé beaucoup de ces travaux, s'est tourné vers la société Hoffmann-La Roche pour la convaincre de mettre au point un traitement sûr. Comme d'autres entreprises pharmaceutiques, elle travaillait déjà à la mise au point de médicaments ciblant l'activité du GABA pour le handicap cognitif en général, mais pas pour la trisomie.

Hoffmann-La Roche a alors développé son propre médicament, qui bloque de façon sélective les récepteurs du cerveau contenant une sous-unité protéique spécifique appelée GABAA α5. En février 2013, elle a publié une étude montrant des réductions significatives des déficiences cognitives avec un modèle de souris trisomique, sans crises d'épilepsie [1]. Elle continue avec deux essais de phase I*, destinés à démontrer la sûreté clinique initiale du médicament chez les personnes trisomiques ou non.

Encouragé par de tels développements, William Mobley, désormais à l'université de Californie, aux États-Unis, prédit l'arrivée d'ici à cinq ans d'un comprimé qui réduira en partie les troubles de l'apprentissage et de la mémoire associés à la trisomie. Hoffmann-La Roche n'est pas la seule société à cibler l'équilibre de l'activité inhibitrice et excitatrice du cerveau des trisomiques, note Michael Harpold. Balance Therapeutics, société californienne, recrute maintenant des participants pour l'essai clinique de phase I d'un composé utilisé dans un sirop pour la toux ayant également montré une influence sur le système GABA.

Onze médicaments potentiels. Alberto Costa, de l'université Case Western Reserve de Cleveland, aux États-Unis, partage l'enthousiasme de William Mobley. Mais presque deux décennies de recherche d'un traitement contre les troubles cognitifs de la trisomie lui ont appris la prudence. « *Les développements récents de la recherche dans ce domaine ont généré au moins onze pistes de médicaments potentiels, dont la nicotine, un extrait de thé vert et divers facteurs de croissance nerveux,* dit-il, *mais tester leur efficacité et leur sûreté sera long, étant donné la prévalence de la maladie, d'environ un pour mille.* »

Pour le récent essai d'Alberto Costa sur la mémantine, médicament déjà utilisé pour ralentir le déclin cognitif lors de la maladie d'Alzheimer, il a fallu quatre ans pour recruter 42 trisomiques. Les participants qui prenaient de la mémantine ont eu de meilleurs résultats à des tests de mémoire verbale que ceux qui prenaient un placebo. Mais ils n'étaient pas assez nombreux pour que l'étude soit concluante. Alberto Costa travaille désormais avec des chercheurs de São Paulo, au Brésil, pour recruter 200 jeunes adultes et adolescents pour la suite de cet essai.

Si les essais cliniques actuels chez les adultes ne fonctionnent pas, c'est peut-être parce que la fenêtre d'opportunité est déjà fermée chez eux. Alberto Costa pense ainsi que de précédents essais sur la mémantine chez des adultes ont « complètement échoué » à démontrer un bénéfice parce que le médicament aurait été administré trop tard. « *On ne peut pas vraiment faire revivre des neurones, ou restaurer un réseau neuronal perturbé si les structures importantes du cerveau ont purement et simplement disparu* », dit-il.

Une fois mature, le cerveau des trisomiques est environ 20 % plus petit que la moyenne, a moins de neurones, et ceux-ci sont reliés par des connexions anormales. Des études sur des modèles de rongeurs trisomiques par Alberto Costa, par Roger Reeves, de l'université Johns-Hopkins, aux États-Unis, et par d'autres, ont révélé que ces anomalies se mettent en place dès les premiers stades du développement. Les régions les plus affectées sont l'hippocampe, le cortex préfrontal, qui dirige les tâches cognitives de ›››

Peut-on soigner la trisomie 21 ?

>>> plus haut niveau, telle la planification, et le cervelet, qui coordonne les mouvements et l'apprentissage, ainsi que l'attention et le langage.

Le cervelet intéresse particulièrement Roger Reeves. Lors du développement normal du cerveau, note-t-il, une population de cellules souches neuronales dans le cervelet *« doit se diviser à toute vitesse le jour suivant la naissance »*. Chez les souris trisomiques qu'il étudie, ces cellules semblent rater le signal de départ. Conséquence : le cervelet n'atteint jamais la bonne taille et le bon fonctionnement.

L'an dernier, Roger Reeves a décidé d'amplifier ce signal de départ. Il a utilisé *Sonic hedgehog*, puissant facteur de croissance responsable de nombreux aspects du développement (c'est grâce à lui, par exemple, que nous sommes symétriques et que nous avons des doigts et des orteils distincts). Le jour de la naissance des souris trisomiques, il a injecté *Sonic hedgehog* dans des cellules de leur cervelet. Il a ensuite observé avec étonnement qu'une seule dose permettait à cette région du cerveau de se développer à vitesse normale et jusqu'à une taille normale. Devenues adultes, les souris en question avaient moins de difficultés d'apprentissage [2]. *« Qu'une simple injection de médicament à la naissance corrige un aspect du développement cérébral était un résultat plutôt satisfaisant et gratifiant »*, constate Roger Reeves.

Il reste toutefois un écart énorme entre les expériences sur la souris et le traitement d'un fœtus trisomique, prévient Jeanne Lawrence, de l'université du Massachusetts, aux États-Unis. *« Si j'allais voir la FDA pour dire que nous aimerions injecter* Sonic hedgehog *à des bébés, elle me ferait probablement arrêter »*, admet Roger Reeves. La prochaine étape, selon lui, est de chercher pourquoi les cellules souches neuronales chez les humains ayant un troisième chromosome 21 sont si réticentes à croître. *« Ce serait une très bonne expérience si nous pouvions désactiver le troisième chromosome dans ces cellules »*, dit-il.

Insertion d'un gène. C'est ce qu'essaie de faire Jeanne Lawrence. L'été dernier, elle a dévoilé avec son équipe une nouvelle technique pour faire « taire » le chromosome 21 supplémentaire [3]. Ils ont inséré dans l'une des copies du chromosome 21 un gène appelé « Xist ». Celui-ci se trouve normalement sur le chromosome X, et sert à en désactiver l'un des deux présents chez les femmes.

En travaillant avec des cellules souches humaines pluripotentes produites par des personnes trisomiques, Jeanne Lawrence utilise des protéines ciblant des séquences d'ADN spécifiques pour insérer Xist dans l'un des exemplaires du chromosome 21. Résultat : ce dernier est complètement désactivé. Sa collègue Jun Jiang, dont le travail est d'amener les cellules souches à se différencier dans des boîtes de Petri, indique que les cellules ainsi modifiées se développent normalement. Au lieu d'un paysage pauvre en neurones ou d'une croissance excessive et malsaine des cellules gliales, Jun Jiang voit prospérer de nombreuses « rosettes neurales », agglomérats précoces de cellules souches qui se transforment ensuite en neurones.

L'utilisation de Xist est un outil puissant pour comprendre ce qui ne va pas chez les trisomiques, selon Jeanne Lawrence. Par exemple, comme l'extinction du chromosome 21 supplémentaire peut être réalisée dans certaines cellules et pas dans d'autres, cela fournira un modèle contrôlé pour tester des médicaments tels que *Sonic hedgehog*. Son équipe prévoit aussi de prélever des cellules souches neuronales à des souris trisomiques, de les traiter avec Xist, et de les réimplanter dans l'hippocampe des rongeurs pour voir si elles prolifèrent et rétablissent les capacités d'apprentissage et de mémorisation.

En tout état de cause, et malgré les espoirs que leurs résultats ont fait naître chez de nombreux parents, Jeanne Lawrence et Roger Reeves s'accordent sur le fait que l'usage de Xist ou de *Sonic hedgehog* pour traiter la trisomie chez l'homme, *in utero* ou à l'âge adulte, n'est pas pour demain. Au-delà des obstacles techniques considérables, il faudra aussi surmonter des difficultés éthiques, en particulier s'il s'agit de traiter *in utero*. *« La façon dont tout cela pourrait s'appliquer à l'homme n'est pas claire pour moi »*, conclut Roger Reeves. ■

Obtenir un consentement éclairé

Mary Ellen McDonough coordonne les essais cliniques menés par Brian Skotko à l'hôpital général du Massachusetts, à Boston, aux États-Unis. Après avoir réalisé qu'un document de consentement éclairé de 21 pages était inapproprié pour les trisomiques, elle en a conçu une version simplifiée illustrée. *« Une société pharmaceutique nommée Elan a un nouveau médicament,* dit une légende près d'une boîte de médicament. *Nous voulons savoir comment le corps des gens réagit au nouveau médicament. »* Des symboles de « pouce levé » et de « pouce baissé » sur une autre page sont légendés « Vous pouvez dire OUI, ou vous pouvez dire NON ». Bien que ce formulaire mentionne les possibilités d'étourdissement, de maux de tête, de somnolence et de douleurs musculaires, Mary Ellen McDonough évite de trop parler des risques avec les participants, car parfois cela les effraie et les rend confus. En revanche, elle aborde ces questions en profondeur avec les parents et les tuteurs, qui doivent aussi donner leur consentement dans la plupart des cas.

[1] C. Martinez-Cué *et al.*, *The Journal of Neuroscience, 33, 3953, 2013.*
[2] I. Das *et al.*, *Sci. Transl. Med., 5,* 201ra120, 2013.
[3] J. Jiang *et al.*, *Nature, 500,* 296, 2013.

Pour en savoir plus

> **http://brianskotko.com**
> **http://bit.ly/JussieuT21**

RÉPARER LES VIES
Depuis notre première prothèse au Cambodge en 1982 nous continuons de soutenir les populations vulnérabilisées
Abris d'urgence – Indonesie 2006
HANDICAP INTERNATIONAL
Avec le soutien gracieux de l'agence – HAVAS WORLDWIDE PARIS

Les révélations d'une météorite martienne

Premier échantillon des terrains les plus anciens de Mars disponible sur Terre, la météorite NWA 7533 complète les informations collectées par les rovers sur l'histoire de la planète Rouge.

PAR **Dominique Padirac,**
ancien professeur de sciences de la Vie et de la Terre, auteur d'ouvrages et d'articles de vulgarisation et animateur de conférences scientifiques. © DR

C'est une pierre noire de 84 grammes. Elle est couverte d'une croûte formée par la fusion de sa surface lors de son entrée à grande vitesse dans l'atmosphère terrestre. Échouée dans le désert marocain il y a quelques années ou des milliers, elle a été trouvée par des nomades en 2012 près de Bir Anzarane.

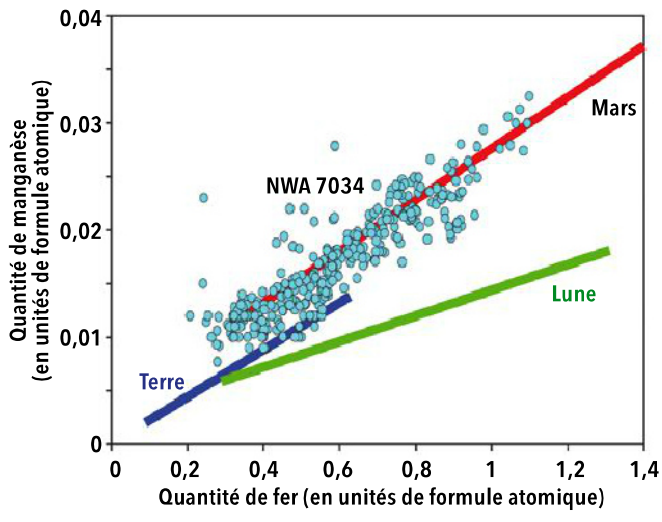
« Elle était sur une zone claire, donc assez facile à repérer », raconte Luc Labenne, collectionneur et vendeur de météorites, qui l'a achetée à un de ses contacts à Agadir en juin 2012. Après confirmation de sa nature météoritique par Roger Hewins et Brigitte Zanda, du Muséum national d'histoire naturelle (MNHN), à Paris, la pierre a reçu de la Meteoritical Society son nom officiel : NWA 7533.

À proximité, les collecteurs avaient ramassé plusieurs autres pierres qui, d'après leur composition, ont la même origine que NWA 7533 : un caillou bien plus gros, qui s'est fragmenté dans l'atmosphère terrestre avant d'atteindre le sol. Deux d'entre elles, nommées NWA 7475 et NWA 7034, sont aujourd'hui étudiées par des équipes américaines.

Si ces roches font l'objet d'une telle attention, c'est que leur analyse minéralogique a montré qu'elles viennent de Mars. Et pas de n'importe où sur Mars : pour la première fois, on dispose en laboratoire de morceaux de régolite* martien, formation constituant la surface même de la planète et contenant des fragments de la première croûte solidifiée ! De quoi mieux comprendre l'histoire de Mars, en complément des analyses menées aujourd'hui par les rovers qui se déplacent à sa surface.

Chaque jour, plusieurs tonnes de matière extraterrestre tombent sur Terre,

Fig.1 Des cristaux martiens



LA RELATION entre les quantités de fer et de manganèse dans les pyroxènes, minéraux inclus dans la météorite NWA 7034, (points bleus) suit la tendance observée dans les autres roches martiennes (en rouge), ce qui prouve qu'ils se sont formés sur cette planète. Les tendances pour les roches de la Terre (en violet) et de la Lune (en vert), sont indiquées à titre de comparaison.

SOURCE : C. AGEE *ET AL.*, *SCIENCE*, *339*, 780, 2013

*LE RÉGOLITE est un mélange de poussières et de débris minéraux produit par les impacts et constamment remanié.

* UNE CHONDRITE est une météorite formée de « chondres », petites billes de silicates.

* LES DIFFÉRENTS ISOTOPES d'un élément chimique contiennent le même nombre de proton mais des nombres différents de neutrons.

La météorite NW 7533 mesure 4 centimètres pour un poids de 84 grammes. Elle est issue de la fragmentation d'une roche dont on a retrouvé d'autres morceaux, comme NWA 7034. Son hétérogénéité est visible, avec des fragments de diverses provenances et des sphérules.

pour l'essentiel en poussières. Mais il y a aussi des roches de tailles variées, les météorites, dont une fraction infime est récoltée, notamment dans les déserts chauds, par des nomades ou des chasseurs spécialisés. La plupart de ces météorites sont des chondrites*, provenant de la ceinture d'astéroïdes, ronde de millions de petits corps gravitant entre Mars et Jupiter. Plus rares sont celles arrachées à une planète à la suite d'un impact. Sur 42 000 météorites répertoriées, environ 150 viendraient de la Lune et 69 de Mars (certaines en plusieurs morceaux).

« À voir des sphérules à la surface de la pierre on pouvait penser que NWA 7533 *était une chondrite »*, explique Luc Labenne. Mais après vingt ans passés à manipuler des météorites, il estime que la pièce est intéressante, et en remet un fragment de 17 grammes à Brigitte Zanda. *« Je l'ai coupée à sec, sans lubrifiant, pour ne pas la polluer »*, précise-t-il.

« Nous avons formé un consortium avec des Américains, des Australiens et des Français. Nous travaillons sur cette roche, en particulier à l'aide de sondes ioniques, dont la nanoSIMS, qui a une bonne résolution spatiale pour l'analyse des éléments chimiques et de leurs différentes formes, leurs isotopes. Nous utilisons aussi des microscopes électroniques, et même un synchrotron, en Australie »*, détaille Brigitte Zanda.

Des instruments possédant une bonne résolution spatiale sont en effet indispensables, tant cette météorite est hétérogène. C'est ce que les spécialistes nomment une « brèche polymicte » : un conglomérat de fragments anguleux ou arrondis de diverses provenances. Les plus nombreux sont faits de roche fondue à la suite d'impacts et recristallisée, chargés d'éclats variés. On trouve aussi de curieuses sphérules provenant de liquide silicaté formé par un impact et refroidi brutalement. Tous ces fragments sont cimentés par une matrice compacte.

Âge moyen de la roche. Un premier indice de l'origine planétaire de cette météorite est publié en février 2013 par Carl Agee, de l'université du Nouveau-Mexique, aux États-Unis, et son équipe, qui étudient, eux, NWA 7034. Ils ont calculé pour cette roche complexe un âge moyen fondé sur des mesures des désintégrations radioactives du rubidium en strontium, et du samarium en néodyme : 2,1 milliards d'années [1]. Or, à l'époque, dans le système solaire, la cristallisation d'une telle roche, d'origine vraisemblablement volcanique, n'a pu se faire sur un astéroïde, seulement sur une planète.

Mais laquelle ? Carl Agee et ses collègues ont étudié la composition de certains minéraux inclus dans la météorite, les pyroxènes*. En particulier, ils y ont mesuré les rapports de concentration du fer et du manganèse. Résultat : ceux-ci sont assez éloignés des valeurs observées pour les roches terrestres ou lunaires, et ›››

L'essentiel

› PLUSIEURS FRAGMENTS d'une roche identifiée comme originaire de Mars ont été découverts au Maroc.

› CE SONT LES PREMIERS ÉCHANTILLONS de sol martien dont on dispose sur Terre.

› LES ANALYSES ont notamment révélé l'âge de la plus ancienne croûte martienne, ainsi que des processus d'altérations dus à l'écoulement d'eau sur la planète Rouge.

© LUC LABENNE

Les révélations d'une météorite martienne

>>> ressemblent à ceux que l'on mesure sur des basaltes martiens et sur une classe de météorites baptisée SNC [fig.1]. L'étude d'autres phases minérales de NWA 7034, comme les feldspaths*, révèle que celles-ci ont en partie aussi une composition proche de celle des météorites SNC. Les rapports des différents isotopes de l'oxygène indiquent également que NWA 7034 provient du même corps que les SNC.

Or, les météorites SNC sont originaires de Mars. Elles correspondent à des roches probablement formées à partir d'un magma basaltique dans la croûte profonde de la planète Rouge. Leur identité martienne repose sur plusieurs arguments. D'abord, les rapports très proches des différents isotopes de l'oxygène indiquent qu'elles proviennent toutes du même corps céleste. Ensuite, il s'agit de roches jeunes, formées il y a moins de 1,4 milliard d'années. Or le seul corps assez massif pour avoir une activité magmatique aussi récente, et dont la gravité permet qu'une météorite puisse s'en détacher suite à un impact extérieur, est Mars. Enfin, les gaz contenus dans le verre d'impact de l'une d'elles ont une composition identique à celle des gaz de l'atmosphère martienne analysée par les sondes Viking dans les années 1970.

Malgré leurs points communs avec les météorites SNC, NWA 7533 et NWA 7034 présentent aussi des différences. La plus évidente est leur composition chimique moyenne, proche de celle mesurée dans le cratère Gusev, à la surface de Mars, par le rover Spirit qui y a évolué de 2004 à 2010. Ainsi que de la composition moyenne de la croûte martienne observée par la sonde Odyssey, en orbite depuis 2002.

Origine précisée. Plus précisément, NWA 7034 et NWA 7533, comme la surface du cratère Gusev et la surface moyenne de la planète, contiennent des concentrations en sodium et en potassium plus élevées que les météorites SNC. D'autres rapports de concentrations entre plusieurs éléments, tels que le magnésium et le silicium, l'aluminium et le silicium, et le nickel et le magnésium, sont aussi semblables entre NWA 7034 et les roches du cratère Gusev. Les météorites sont donc issues d'un morceau du régolite martien. C'est la première fois que l'on trouve de tels échantillons sur Terre.

Pouvait-on être plus précis quant à leur origine ? Dans les fragments de roches fondues et dans la matrice qui les englobe, les minéralogistes ont mesuré des concentrations de nickel et d'iridium beaucoup plus élevées que dans les météorites SNC : respectivement de 400 à 700 parties par million et 10 à 80 parties par milliard. Les rovers qui ont pratiqué des analyses sur place détectent aussi des concentrations élevées de nickel à la surface de Mars.

De telles concentrations de nickel et d'iridium ne peuvent pas provenir de la croûte martienne. Lors de la formation de la planète, lorsqu'elle était encore en fusion, ces éléments étaient dissous dans le fer liquide. Ils ont accompagné celui-ci dans sa migration vers le noyau par gravité. Le nickel et l'iridium présents en surface ont donc été apportés après coup, par des impacts de chondrites, qui sont riches en ces deux éléments. Selon les chercheurs, celles-ci auraient contribué pour 5 % à la constitution de la croûte.

Conclusion, NWA 7533 et ses sœurs viennent d'une région superficielle de Mars ayant subi un fort bombardement météoritique. Or la planète possède une étrange dissymétrie hémisphérique : au nord, des plaines de basse altitude et jeunes, puisque quasiment dépourvues de cratères. Au sud, de vieux et hauts plateaux fortement cratérisés, plus élevés en moyenne de 4 kilomètres par rapport aux plaines du nord. Le plus probable est donc que ces nouvelles météorites martiennes proviennent de l'hémisphère Sud.

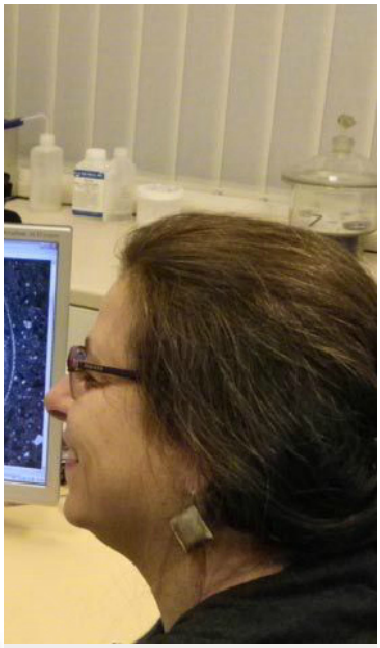
Selon Munir Humayun, de l'université d'État de Floride, qui a participé aux recherches sur NWA 7533, *« cette météorite est extraordinaire : c'est la première météorite originaire des hautes terres du sud de Mars. Grâce à elle, nous pouvons examiner au laboratoire les roches étudiées sur place par les rovers Spirit (qui a cessé de fonctionner) et Curiosity (toujours en action). C'est très excitant ! »*. D'autant plus que les spécialistes de Mars pensent que ces terrains contiennent, à cause notamment de leur ancienneté, les indices permettant de comprendre la naissance et l'histoire précoce de Mars [2].

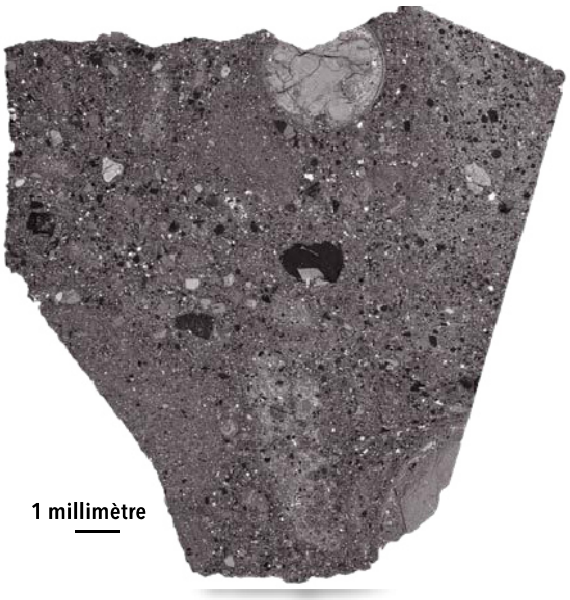
L'expulsion de la planète Mars

Seul un phénomène violent peut expulser une roche de sa planète d'origine : le choc tangentiel d'un astéroïde ou d'une comète. Pour la roche mère de NWA 7533 et NWA 7034, on sait que cet événement s'est produit au plus tôt il y a 11 millions d'années. En effet, tout le temps de son voyage depuis Mars jusqu'à la Terre, elle a été exposée à des rayonnements cosmiques de haute énergie qui ont généré des éléments radioactifs, dont les concentrations permettent d'estimer le temps passé dans l'espace. Après avoir erré dans l'espace interplanétaire, le fragment devient une « météorite martienne » lorsqu'il croise l'orbite de la Terre et en atteint le sol. Sur 69 météorites martiennes, seule celle qui a ensuite donné naissance à NWA 7533 et NWA 7034 est originaire de la surface. Cette faible représentation n'étonne pas Pierre Thomas, de l'École normale supérieure de Lyon : *« Imaginons qu'avant l'impact la croûte superficielle mesure de 20 à 200 mètres d'épaisseur, soit 1/100e à 1/1 000e de la profondeur du futur cratère. Il constituera alors 1/100e à 1/1 000e du volume des éjectas. Rien d'étonnant à ce que les météorites d'origine superficielle soient largement minoritaires. »*

***LES PYROXÈNES** sont des silicates contenant différents métaux (magnésium, fer et calcium).

***LES FELDSPATHS** sont des minéraux à base de silicate d'aluminium contenant aussi du potassium, du sodium ou du calcium.





Cette coupe de la météorite NW 7533 a été observée au microscope à balayage par Brigitte Zanda et Sylvain Pont au Muséum national d'histoire naturelle (en haut). On voit nettement une sphérule (en haut et sur l'écran), résultant d'une fusion par impact, ainsi qu'un grain de felsdpath (en noir, au centre). © MNHN

NWA 7533 a déjà fourni des informations nouvelles à propos de Mars. Ainsi, les géochimistes ont calculé que la première croûte martienne a au moins 4,423 milliards d'années. À l'aide d'une microsonde ionique de haute résolution, ils ont pour cela mesuré l'âge de cristallisation de zircons, de 6 à 70 micromètres de diamètre, contenus dans la météorite, qui ont cristallisé sur Mars lorsque la croûte s'est solidifiée. Cela s'est donc produit très tôt, 100 millions d'années seulement après la naissance du système solaire, en même temps que cristallisaient les croûtes de la Lune et de la Terre. Les mêmes zircons ont enregistré il y a 1,7 milliard d'années un événement qui pourrait correspondre selon Brigitte Zanda à l'impact ayant compacté le régolite, transformant cette formation poussiéreuse en une brèche polymicte.

D'autres données très intéressantes concernent des processus géochimiques qui se sont produits à la surface de Mars. Ainsi, la composition chimique de NWA 7533 diffère légèrement de celle des roches du cratère Gusev. En particulier, la météorite est appauvrie en soufre, en chlore et en zinc. Selon Munir Humayun, c'est dû probablement au fait que ces éléments solubles étaient transportés par l'eau de préférence vers des lacs et des mers, il y a 2 milliards d'années. Il faut toutefois rester prudent : des résultats récents, obtenus par Jean-Pierre Lorand de l'université de Nantes et ses collègues du MNHN, laissent penser que le soufre a été perdu par altération sur Terre.

De l'eau, selon Carl Agee et son équipe, NWA 7034 en contient beaucoup : 0,6 %, soit 10 fois plus que les autres météorites martiennes. Cela indiquerait une forte humidité en surface à l'époque de sa formation. Brigitte Zanda émet toutefois quelques réserves : « *0,6% c'est a priori énorme pour une roche martienne. Carl Agee a fait couper NWA 7034 à grande eau, et ces roches ont été soumises pendant des années aux intempéries dans le désert marocain.* » Néanmoins, elle concède que, selon la composition en isotopes de l'oxygène, au moins la moitié de cette eau est d'origine martienne.

Absence d'olivine. Quoi qu'il en soit, l'eau est intervenue dans certaines altérations de la croûte martienne, comme le soulignent les résultats qu'ont présentés Munir Humayun et ses collègues, en mars 2014, lors d'une conférence à Houston, aux États-Unis [3]. Les spécialistes de Mars s'interrogeaient : pourquoi certaines parties des hauts plateaux du sud sont-elles dépourvues d'olivine, silicate de magnésium et de fer ? D'après les observations en infrarouge depuis l'espace, ce minéral est pourtant présent en abondance dans les basaltes qui couvrent largement la planète. Or, on ne trouve pas non plus d'olivine dans NWA 7533 « *Nos études indiquent que cette absence s'explique si l'olivine présente au départ a été altérée par une eau peu saline et neutre* », explique Munir Humayun. Ce processus transforme l'olivine, notamment en oxydes de fer et en argiles.

Les argiles ont disparu de NWA 7533. « *Elles ont été détruites par fusion sous les impacts répétés qui affectaient les hauts plateaux* », précise le géochimiste. Quant aux oxydes de fer, on en trouve en abondance dans la météorite. « *C'est vraisemblablement l'altération de l'olivine par l'eau qui a formé les oxydes de fer qui coloraient déjà Mars en rouge il y a 4,43 milliards d'années* », souligne Munir Humayun. ■

[1] C. Agee *et al.*, *Science, 339*, 780, 2013.
[2] M. Humayun *et al.*, *Nature, 503*, 513, 2013.
[3] M. Humayun *et al.*, *45th Lunar and Planetary Science Conference*, Houston, 2014, 1880.

Pour en savoir plus

- **bit.ly/ENSLyonMeteoriteMars**
- **bit.ly/NASAMarsMeteorites**
- **bit.ly/IrvingMarsMeteorites**

La tardive diversificatio

Les mammifères qui peuplent aujourd'hui la planète descendent de lignées qui ne se sont développées qu'après la fin de la suprématie des grands dinosaures.

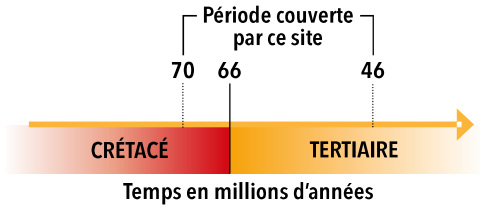
PAR **Lise Barnéoud,** journaliste.

C'est un crâne d'environ 9 centimètres de long sur 3 de large, avec encore des dents de la mâchoire supérieure. Emmanuel Gheerbrant, du Muséum national d'histoire naturelle (MNHN), à Paris, et ses collègues, qui l'ont découvert au Maroc, l'attribuent à l'espèce *Ocepeia daouiensis,* dont ils ne connaissaient jusqu'à présent que quelques dents. Avec ses 60 millions d'années environ, c'est le plus vieux crâne d'un mammifère placentaire africain [1].

Selon ses caractéristiques morphologiques, il serait assez proche de l'ancêtre commun de trois groupes de mammifères herbivores modernes contenant respectivement les éléphants, les damans (sortes de marmottes africaines actuelles) et les lamantins. Ajouté aux autres fossiles découverts depuis une vingtaine d'années au même endroit, dans la carrière de phosphate de Khouribga, à une centaine de kilomètres au sud de Rabat, il permet ainsi de mieux comprendre l'histoire évolutive des mammifères africains. Et, plus globalement, ces découvertes suggèrent fortement que la diversification des mammifères placentaires, dont nous faisons partie, s'est produite au début de l'ère Tertiaire, il y a 66 millions d'années, après que la plupart des dinosaures eurent disparu. Un argument pour les paléontologues dans le débat qui les oppose aux généticiens, jusqu'ici, pour la plupart, partisans d'une diversification plus ancienne.

Fragment de mâchoire. Bien avant *Ocepeia daouiensis,* il y a eu *Phosphatherium escuilliei.* En 1994, lors d'une bourse aux fossiles, à Millau, dans l'Aveyron, François Escuillié, auquel cette espèce doit son nom, découvrit un minuscule fragment de mâchoire dissimulé au milieu d'une centaine de dents de requins en provenance du Maroc. Ce collectionneur, alors directeur du musée Rhinopolis, dans l'Allier, apporta aussitôt la pièce à Emmanuel Gheerbrant.

Des paléontologues fouillent dans la carrière de phosphate de Khouribga, au Maroc. Il y a 70 à 46 millions d'années, le site était une mer chaude et peu profonde où des carcasses d'animaux terrestres sont venues s'échouer. © E. GHEERBRANT/CNRS-CR2P



n des mammifères

© CR2P, MNHN-CNRS-UPMC

Ce crâne *d'Ocepeia daouiensis de* 60 millions d'années est le plus ancien connu pour un mammifère placentaire africain. Certains caractères le rapprochent des ongulés africains modernes tels que les éléphants, mais il a aussi des caractères primitifs typiques d'insectivores.

Celui-ci, reconnaissant un reste de mammifère très primitif, probablement très ancien, mena alors une minutieuse enquête qui, du revendeur de fossiles au fouilleur qui l'avait exhumé, le conduisit dans l'immense carrière de phosphate de Khouribga. Là, au milieu des pelleteuses et des camions, il entreprit des fouilles officielles avec l'accord de l'Office chérifien des phosphates, propriétaire du gisement. En quelques années, il découvrit avec ses collègues plusieurs dizaines d'autres fragments de mammifères datés entre 46 et 60 millions d'années, au début du Tertiaire. C'était la première fois que des paléontologues accédaient au tout début de l'histoire des mammifères modernes d'Afrique.

Le site de Khouribga couvre en fait une période plus longue encore, entre 70 et 46 millions d'années, avant et après la dernière grande extinction, qui marque le passage du Crétacé au Tertiaire et qui a vu s'éteindre la suprématie des dinosaures. C'est le seul à offrir un tel laps de temps à la fois avant et après la crise.

Ce site était connu des paléontologues depuis 1937 pour sa richesse en fossiles marins. Aujourd'hui encore, il suffit de prendre une poignée de poudre blanche de phosphate pour y découvrir des dizaines de dents pointues de requin, ou aplaties de raie. Plus de 330 espèces ont été identifiées ici, essentiellement des requins et des raies, mais aussi des poissons, des reptiles marins (mosasaures, crocodiles, tortues) ou encore des oiseaux marins.

Matrice protectrice. Ce plateau situé aujourd'hui à 800 mètres d'altitude était, il y a plusieurs dizaines de millions d'années, une mer chaude et peu profonde, enrichie en matière organique grâce aux courants océaniques profonds qui remontaient le long de la marge atlantique africaine. À leur mort, les animaux étaient dévorés par des bactéries « phosphatogènes », qui les entouraient d'une matrice protectrice de phosphate. Les squelettes et les dents, déjà minéralisés, sont restés intacts. Ces fossiles se sont alors accumulés dans des couches de plus en plus épaisses de phosphate, où ils ont été conservés depuis.

Mais pourquoi y a-t-il des fossiles de mammifères terrestres dans cet environnement marin ? *« Il s'agit très probablement d'animaux morts sur la* ›››

L'essentiel

› LE PLUS VIEUX CRÂNE de mammifère placentaire africain a été découvert au Maroc, il a 60 millions d'années.

› LES MAMMIFÈRES existaient bien avant, mais les placentaires actuels ne se sont diversifiés qu'après la disparition des dinosaures il y a environ 66 millions d'années.

› LES DONNÉES GÉNÉTIQUES confirment ce scénario, mais ses causes restent débattues.

La tardive diversification des mammifères

›››› *terre ferme dont les carcasses ont été emportées par les rivières,* explique Nour-Eddine Jalil, du MNHN. *La faible pente de la côte continentale a évité leur désagrégation rapide, ce qui nous permet de trouver quelques fossiles de mammifères relativement complets.* »

La grande majorité des fossiles de mammifères exhumés ici appartiennent à *Phosphatherium escuilliei* : c'est un proboscidien (ordre auquel appartiennent les éléphants), d'environ 55 millions d'années [2]. Toutefois, 9 autres espèces ont aussi été découvertes, toutes de mammifères placentaires. Il y a 4 espèces de « condylarthres », groupe d'ongulés primitifs aujourd'hui éteint, auquel appartient *Ocepeia daouiensis* ; 2 autres espèces de proboscidiens ; 2 espèces d'hyaenodontides (également appelé « créodontes »), mammifères carnivores disparus ; et 1 espèce d'hyracoïde, groupe auquel appartiennent les damans.

« *Pour l'heure, nous découvrons des mammifères uniquement dans les couches 1 et 2 de la carrière, ce qui correspond au tout début du Tertiaire. On n'en retrouve aucun dans la couche 3, plus profonde, qui remonte à plus de 65 millions d'années,* précise Emmanuel Gheerbrant. *C'est un peu comme si vous regardiez un théâtre dont la scène ne changerait pas mais où tous les acteurs se renouvelleraient. Avant 66 millions d'années, nous avons des dinosaures, après, des mammifères.* » Surtout, les acteurs semblent évoluer rapidement après ce bouleversement : en quelques millions d'années, arrivent sur scène des mammifères de plus en plus gros, de plus en plus diversifiés, avec des caractères propres.

Prenons le cas des ongulés. Le plus vieux représentant des ongulés modernes découvert à Khouribga a environ 60 millions d'années. Il s'agit d'*Eritherium azzouzorum,* plus ancien proboscidien connu, et l'un des plus vieux fossiles d'un ordre mammalien qui a toujours des représentants aujourd'hui [3]. « *Cet animal est beaucoup plus primitif que les autres fossiles de proboscidiens. Seules la position de ses molaires, avec leurs deux crêtes naissantes, et la forme de son arcade zygomatique nous prouvent qu'il appartient bien à cet ordre* », commente Pascal Tassy, du MNHN.

Ni trompe ni défenses. Pour le reste, l'animal avait la taille d'un chat, pesant de 4 à 5 kilogrammes, et n'avait ni trompe ni défenses. « *Cela nous prouve que nous sommes au tout début de la diversification du groupe* », juge Kenneth Rose, de l'université Johns-Hopkins, aux États-Unis. Or, les deux autres espèces de proboscidiens plus récentes découvertes sur place montrent qu'en l'espace de 7 millions d'années, on passe à la taille d'un cerf, pour un poids d'environ 200 kilogrammes. À chaque étape, des caractères de plus en plus dérivés apparaissent, tels que le développement du maxillaire, une incisive centrale de plus en plus grande, des molaires dans lesquelles les deux crêtes transversales sont de plus en plus marquées et acérées [4]. « *C'est la preuve qu'il n'a pas fallu 50 millions d'années pour que des mammifères placentaires modernes apparaissent* », souligne Pascal Tassy.

Mais ce n'est pas tout. *Eritherium azzouzorum* partage de nombreuses similarités avec les autres espèces de mammifères herbivores découverts dans ce gisement de phosphate, notamment avec l'hyracoïde. C'est donc que leur ancêtre commun n'est pas tellement plus ancien.

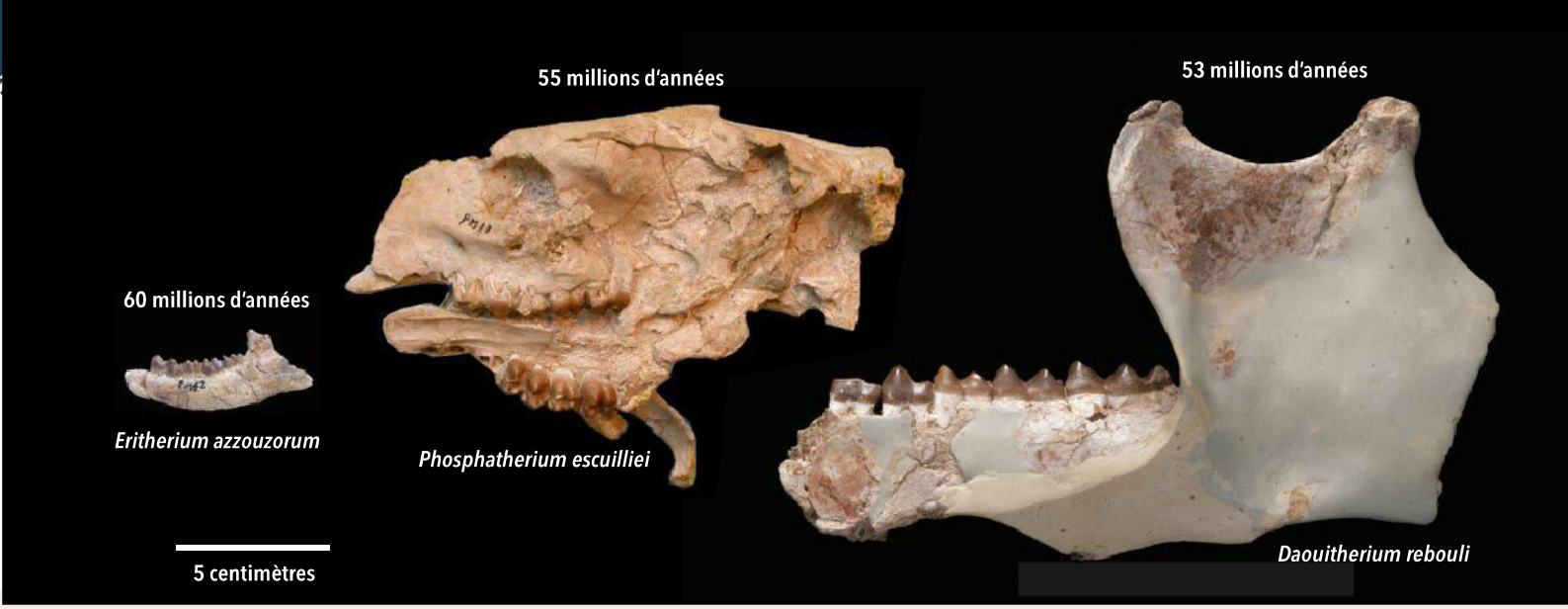
D'ailleurs, les paléontologues viennent de se rapprocher de ce dernier avec la découverte du crâne d'*Ocepeia daouiensis,* qui a le même âge, mais des caractères plus primitifs encore. « *Ce mammifère regroupe les caractéristiques attendues de l'ancêtre commun des mammifères africains de type ongulé mais il présente aussi certaines caractéristiques spécialisées : la preuve qu'il possède une histoire évolutive antérieure. Il s'agit donc très probablement d'un descendant proche de l'ancêtre commun aux éléphants, damans et lamantins,* commente Emmanuel Gheerbrant. *Cet ancêtre commun vivait donc sans doute avant la crise du Crétacé-Tertiaire, certains groupes souches avaient déjà commencé à se différencier, mais c'est après l'extinction des dinosaures que la diversification des différents ordres actuels de mammifères se fait.* »

« *Ces fossiles suggèrent que nous nous approchons de la base de la radiation des mammifères africains. Difficile dans ces*

© E. GHEERBRANT/CNRS-CR2P

Des agriculteurs convertis en chasseurs de fossiles

De plus en plus d'agriculteurs de la région de Khouribga abandonnent leurs champs pour se consacrer à la recherche de fossiles. Environ 300 familles en vivent aujourd'hui. Une mâchoire de plésiosaure du Crétacé se négocie par exemple à 30 000 dirhams, soit plus de 2 600 euros, un mosasaure complet peut aller jusqu'à 70 000 dirhams (6 250 euros). Quant au prix d'une mâchoire de mammifère, beaucoup plus élevé, il reste secret. « *Depuis que l'on sait qu'il y a ici des mammifères fascinants, le trafic de fossiles a explosé* », confirme un ancien géologue de l'Office chérifien des phosphates (OCP). Lui-même, retraité, fouille dès qu'il en a le temps, et passe régulièrement voir les revendeurs de fossiles afin de contrôler leurs trouvailles. « *Dès que je vois une belle pièce, j'en informe les paléontologues et l'OCP, et nous essayons de les acheter pour les conserver pour la science* », précise-t-il. Certains scientifiques critiquent cet approvisionnement « sauvage », qui attire de plus en plus de chasseurs de fossiles, théoriquement interdits d'accès au sein de la mine. « *S'ils ne collectaient pas ces fossiles, ceux-ci termineraient en engrais* », répond Emmanuel Gheerbrant, du Muséum national d'histoire naturelle.



L'ordre des proboscidiens (auquel appartiennent les éléphants) est représenté rapidement par des animaux de plus en plus gros entre 60 millions d'années (*Eritherium azzouzorum*, 4 à 5 kilogrammes), 55 millions d'années (*Phosphatherium escuilliei*, 10 à 15 kilogrammes) et 53 millions d'années (*Daouitherium rebouli*, 200 kilogrammes).

conditions de faire remonter leur diversification à 100 millions d'années, comme le font certains généticiens », tranche Kenneth Rose. En se fondant sur l'analyse de l'ADN des mammifères actuels, et sur la technique de « l'horloge moléculaire »*, de nombreux généticiens estiment en effet que cette radiation débute avant la crise Crétacé-Tertiaire. Certains la situent même il y a 100 millions d'années, juste après la séparation des continents sud-américain et africain. *« Nos fossiles montrent clairement que pour les groupes africains, tout se passe au début du Tertiaire »*, assure Emmanuel Gheerbrant.

Niches écologiques vacantes. Mario Dos Reis, du University College à Londres, au Royaume-Uni, qui vient de publier avec ses collègues un article où il présente ses propres datations fondées sur les génomes complets des mammifères modernes, partage d'ailleurs ce point de vue. *« Nous avons obtenu les données génétiques les plus précises jusqu'à maintenant, et elles montrent une diversification des mammifères postérieure à la crise Crétacé-Tertiaire »*, précise-t-il [5].

L'affaire semble donc désormais entendue, même s'il faudra certainement convaincre encore un certain nombre de généticiens sceptiques. Mais une question demeure sans réponse satisfaisante : que s'est-il passé, il y a 66 à 50 millions d'années, qui a permis aux mammifères de se diversifier ainsi ?

L'explication la plus couramment avancée réside dans la disparition de la quasi-totalité des dinosaures juste avant cette période. De nombreux animaux auraient profité de leur disparition pour occuper les niches écologiques devenues vacantes. *« Pour la faune marine, c'est flagrant : nous avons des mosasaures, gigantesques reptiles, jusqu'à la fin du Crétacé et plus rien ensuite, alors que les crocodiles marins surgissent juste après la fin du Crétacé et se diversifient rapidement. Or, il existe de nombreuses similitudes entre ces deux groupes, ce qui nous fait dire que les crocodiles marins ont bel et bien occupé la niche écologique abandonnée par les mosasaures »*, explique Nathalie Bardet, du MNHN, qui étudie la faune marine des gisements de phosphate marocains.

« Le scénario semble identique chez les mammifères », estime Kenneth Rose. Mais Pascal Tassy émet quelques réserves : *« Chez les mammifères placentaires, la colonisation des niches écologiques semble s'être effectuée selon un tempo découplé de l'extinction des dinosaures terrestres. Ils ont commencé à se diversifier avant la disparition des dinosaures, mais il faut ensuite attendre plus de 10 millions d'années après cette extinction massive avant de voir émerger des proboscidens qui occupent la place de certains de ces géants herbivores. Et encore, ces animaux ne faisaient pas plus de 2 mètres au garrot… Le scénario est sans doute un peu plus compliqué qu'une simple colonisation de niches laissées vacantes. »*

Ce renouvellement faunistique se serait donc déroulé en plusieurs étapes. La première juste avant la limite Crétacé-Tertiaire, avec l'émergence des premiers mammifères placentaires. Une seconde au moment de cette crise biologique, où l'on assiste à une diversification des principaux ordres de mammifères modernes, dont certains existent encore. Puis une troisième phase, 10 millions d'années plus tard, avec une évolution rapide des espèces, mais aussi une diversification au sein de chaque ordre. Elle pourrait être liée au réchauffement majeur qu'a connu la planète au début de l'Éocène, entre – 55 et – 50 millions d'années. Au chaud, sans l'ombre des dinosaures, les ancêtres des mammifères modernes auraient trouvé les conditions idéales pour prospérer. ■

*L'HORLOGE MOLÉCULAIRE est une technique de datation de l'apparition des lignées fondées sur les nombres de mutations génétiques accumulées par celles-ci et sur des fossiles de référence intermédiaires bien datés.

[1] E. Gheerbrant *et al.*, *PlosOne, 9*, e89739, 2014.
[2] E. Gheerbrant *et al.*, *Nature, 383*, 68, 1996.
[3] E. Gheerbrant *et al.*, *Palaeontographica Abteilung, A 297*, 151, 2012.
[4] E. Gheerbrant et P. Tassy, *C. R. Palevol, 8, 281*, 2009.
[5] M. Dos Reis *et al.*, *Biology Letters*, 10, 20131003, 2014.

Pour en savoir plus

> E. Gheerbrant, Origine et diversification des mammifères modernes, *Espèces, 3*, 22, 2012.
> J.L. Hartenberger, *Une brève histoire des mammifères*, Belin, 2001.
> G. Lecointre et H. Le Guyader, *Classification phylogénétique du vivant*, Belin, 2001.

Portrait *d'un mathématicien*

© PHOTOS : BERTRAND DESPREZ

Emmanuel Breuillard est né à Poitiers en 1977. Il entre en 1997 à l'École normale supérieure à Paris. Il suit un master à l'université de Cambridge, au Royaume-Uni, puis réalise, à l'université Yale, aux États-Unis, une thèse qu'il soutient en 2004. Après des séjours post-doctoraux à l'Institut des hautes études scientifiques, à Bures-sur-Yvette, dans l'Essonne, et à l'Institut des études avancées de Princeton, aux États-Unis, il entre au CNRS en 2005, à l'université de Lille, puis occupe un poste de professeur associé à l'École polytechnique. En 2008, il est nommé professeur à l'université Paris-Sud. Lauréat de nombreux prix, il est conférencier invité au prochain Congrès international des mathématiciens qui aura lieu en août à Séoul, en Corée du Sud.

« J'ai une approche des mathématiques »

Éclectique, Emmanuel Breuillard est un jeune mathématicien brillant qui collabore sur des sujets très divers, aux interfaces de la théorie des groupes, de la géométrie ou des probabilités.

« *Je travaille souvent au café,* justifie Emmanuel Breuillard, qui reçoit au *Rostand,* face au Jardin du Luxembourg, à Paris. *D'ailleurs, ce lieu est un repaire de mathématiciens.* » Effectivement, la proximité de l'École normale supérieure, de l'Institut Henri-Poincaré et de l'université Pierre-et-Marie-Curie fait que l'on y croise plusieurs de ses confrères attablés. Buvant son thé avec calme, il semble un peu timide et n'aime pas parler de lui. S'il a finalement accepté que *La Recherche* publie son portrait, c'est qu'il veut faire partager sa passion des mathématiques. Une passion née lorsqu'il était encore collégien.

« *Enfant curieux, j'avais un goût pour l'étude et la lecture. Je passais beaucoup de temps à lire dans ma chambre* », se souvient-il. L'astronomie le passionne. Les échecs aussi, loisir que ses parents, tous deux professeurs de russe à Poitiers, lui transmettent. Mais ce n'est pas le noble jeu qui le fait s'intéresser aux mathématiques : c'est un livre de questions mathématiques pour enfants rapporté de Russie par son père alors qu'il était encore au collège. Ce petit livre, plein de devinettes et de jeux d'esprit, est une révélation : « *C'est la première fois que je me suis mis à réfléchir par moi-même, et que j'ai pris conscience de la puissance inattendue de la pensée pure.* »

À l'origine de sa passion : un livre pour enfants rapporté de Russie par son père

Sa scolarité à Poitiers est marquée par une rencontre avec un professeur de lycée. « *Hassan Tarfaoui était un enseignant qui avait une haute opinion des mathématiques. Il m'a beaucoup épaulé* », estime Emmanuel Breuillard. Un soutien qui porte ses fruits, puisque au cours de l'année de terminale, le jeune homme est couronné par le premier prix au concours général de mathématiques. Il enchaîne avec une médaille d'or aux Olympiades internationales de la discipline qui se tiennent, en 1995, à Toronto, au Canada. « *J'ai été content et surpris de voir que même venant d'un lycée de province, on pouvait bien réussir en mathématiques. C'est aussi là que s'est exacerbé mon plaisir de chercher et de raisonner* », précise-t-il.

ENS, Cambridge et Yale. La « voie royale » s'ouvre alors à lui : classes préparatoires au lycée Louis-le-Grand, à Paris, et École normale supérieure (ENS). Même s'il apprécie la plupart des enseignants, très stimulants, il est déçu par ses premières années à l'ENS : « *On suivait trop de cours. De plus la manière d'apprendre était trop proche de celle de la prépa : on nous faisait faire beaucoup d'exercices, mais on ne nous apprenait pas à raisonner.* » Agrégation de mathématiques en poche, il quitte Paris pour suivre un master spécialisé de mathématiques, à Cambridge.

« *Cela a été un vrai dépaysement car, en Angleterre, on porte une grande attention à chaque élève, avec un système de tuteur. L'approche est beaucoup plus personnalisée* », se souvient-il. Il apprécie cette année de coupure qui lui permet de prendre un peu de recul, de consolider ses connaissances, avec une pression moindre qu'en France. Hasard, pendant qu'il est à Cambridge, s'y déroule un semestre thématique sur l'application de la « théorie ergodique » à d'autres domaines des mathématiques (la théorie ergodique est une branche des mathématiques, née de questionnements de physique statistique, qui étudie l'évolution des systèmes). Il rencontre des mathématiciens de renom venus y participer, et notamment Gregori Margulis, qui a été l'un des premiers à appliquer la théorie

pluridisciplinaire

ergodique en théorie des nombres (ce qui lui a valu la médaille Fields en 1978). Le courant passe si bien entre les deux mathématiciens qu'Emmanuel Breuillard le suit à l'université Yale, aux États-Unis, pour y faire sa thèse.

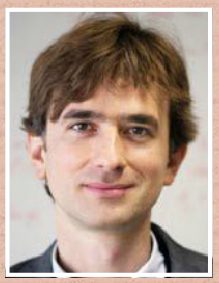
Les groupes discrets. Ce nouveau changement de décor lui permet d'apprécier une structure scientifique agencée en petites unités de recherche, dans des lieux bien identifiés : *« Les mathématiciens américains vivent dans leur campus et sont chaque jour à leur bureau, alors qu'en région parisienne, ils sont beaucoup plus délocalisés. »* Il apprécie cette ambiance studieuse, mais pour des raisons familiales, après sa thèse, il rentre en France, où, après divers postes, il est recruté en 2008 comme professeur à l'université Paris-Sud.

A-t-il une spécialité en mathématiques ? *« Je ne me vois pas comme un spécialiste d'un domaine, j'ai plutôt une approche pluridisciplinaire des mathématiques. Je travaille au carrefour de divers domaines »*, juge-t-il. *« Toutefois, si on devait trouver un mot clé à mon travail, ce serait "les groupes discrets". »* La théorie des groupes est en effet omniprésente dans son travail. Un groupe est simplement l'ensemble des symétries d'un objet ou d'un espace. On distingue souvent les groupes continus (comme l'ensemble de toutes les transformations linéaires du plan) et les groupes discrets (par exemple le sous-ensemble des transformations qui préservent les points à coordonnées entières). À chaque groupe continu correspond une géométrie, telles la géométrie euclidienne ou la géométrie hyperbolique, et à chaque sous-groupe discret est associé une variété, un espace modelé sur la géométrie du groupe continu ambiant. D'un point de vue algébrique, les éléments de ces groupes sont représentés par des matrices, tableaux de chiffres soumis à certaines contraintes. ›››

Après un prix de la Société mathématique européenne en 2012, Emmanuel Breuillard sera-t-il cette année le prochain médaillé Fields ? Ce théoricien des groupes aimerait bien que *« la médaille soit attribuée à une femme : ce serait la première fois »*.

Portrait d'un mathématicien

Emmanuel Breuillard



Son laboratoire

Le département de mathématiques de la faculté des sciences d'Orsay, de l'université Paris-Sud, est l'un des plus grands regroupements de mathématiciens en France. Il rassemble plus d'une centaine de chercheurs et d'enseignants-chercheurs qui se répartissent en cinq équipes. Celles-ci couvrent quasiment tout le champ des mathématiques pures. Emmanuel Breuillard travaille dans l'équipe topologie et dynamique.

Ses publications

Emmanuel Breuillard a publié une trentaine d'articles dans les revues à comité de lecture avec une dizaine de collaborateurs.

›››› Emmanuel Breuillard est sans doute un théoricien des groupes, mais avec une vue large, utilisant les probabilités, la géométrie, la théorie ergodique, les systèmes dynamiques, la logique mathématiques pour obtenir des résultats novateurs. « *L'une de ses forces c'est qu'il comprend vite les avancées des gens qui sont autour de lui, même de domaines différents. Et non seulement il comprend les résultats, mais aussi les questions qui sont ouvertes. Et en collaborant avec un vaste réseau de gens et en utilisant son large spectre de connaissances, il parvient à trouver de nouvelles choses et à faire des liens inattendus* », raconte Yves Benoist, du CNRS, qui fut son mentor alors qu'il était élève à l'École normale supérieure.

Culturellement, il a été bercé par la théorie des groupes discrets. Son directeur de thèse, Gregori Margulis, avait démontré des théorèmes importants dans ce domaine dans les années 1970. L'un de ses résultats marquants a consisté à montrer, en 2006, la « croissance exponentielle uniforme » des groupes discrets (ce qu'on appelle l'alternative de Tits uniforme). Prenons deux matrices A et B, et regardons toutes les matrices que l'on obtient en les multipliant n fois (si $n = 3$, on obtient A^3, A^2B, ABA, BA^2 et B^3, B^2A, BAB, AB^2). Le Belge Jacques Tits avait montré en 1972 que le nombre de ces produits distincts les uns des autres croît exponentiellement avec n, à moins qu'une contrainte algébrique forte n'existe sur l'ensemble de départ. Emmanuel Breuillard a montré qu'en général cette croissance exponentielle ne dépend d'aucun paramètre (elle est « absolument uniforme »).

Continuer à raisonner, voilà ce qui le passionne dans les mathématiques

Un autre aspect de son travail est lié à la « théorie géométrique des groupes ». Celle-ci a été développée dans les années 1970 et 1980 par Misha Gromov, aujourd'hui à l'Institut des hautes études scientifiques, à Bures-sur-Yvette, dans l'Essonne. Emmanuel Breuillard a réussi à faire le lien entre cette théorie et la combinatoire additive, branche de la théorie des nombres. Avec Terence Tao, de l'université de Californie, à Los Angeles (médaillé Fields en 2006), et Ben Green, de l'université d'Oxford, au Royaume-Uni, il a notamment développé la théorie des « groupes approximatifs », qui est une sorte de généralisation non commutative de la combinatoire additive. Autrement dit, ils travaillent dans des groupes où le produit ne commute pas : $A \times B$ diffère de $B \times A$.

Ces deux travaux, plus que les nombreux autres qu'il a menés, ont retenu l'attention de ses confrères. Ils lui ont valu en 2012 un prix de la Société mathématique européenne, dont plusieurs lauréats ont par la suite reçu la médaille Fields. De là à penser qu'il en obtiendra une lors de la prochaine attribution de ce prix, à Séoul en août prochain, il n'y a qu'un pas. Mais il se refuse à le franchir : « *Franchement, je ne pense pas. Il y a beaucoup de jeunes mathématiciens très talentueux. Et ce serait bien que la médaille soit attribuée à une femme : ce serait la première fois.* »

Générosité mathématique. « *Sur le plan des mathématiques, c'est quelqu'un de généreux, qui aime beaucoup échanger et discuter avec d'autres* », précise Bertrand Deroin, qui a été son collègue à Orsay et qui est maintenant au CNRS à Paris. Cette générosité se traduit par des collaborations nombreuses. Une générosité qui n'est pas uniquement mathématiques. Assaf Naor, de l'Institut Courant de New York, se souvient que lorsqu'ils coorganisaient un semestre thématique sur la géométrie quantitative, à Berkeley, en 2011, Emmanuel Breuillard était sur tous les fronts : « *Il m'impressionnait déjà comme mathématicien, mais là il m'a impressionné comme humain : il s'occupait de tâche administrative à Berkeley, partait à Shanghai où sa femme était en poste avec ses enfants, puis allait s'occuper de son père malade en France. C'était presque surhumain !* »

Ce qui le passionne dans ce métier c'est de continuer à raisonner. « *Je me plains d'avoir trop de travail, mais le métier de mathématicien est remarquable. On ne s'ennuie jamais. Et ça, c'est inestimable.* » Ses nouvelles recherches ? « *L'une de mes préoccupations actuelles est très liée à un problème de théorie des nombres baptisé "conjecture de Lehmer". Bien qu'*a priori *elle n'ait rien à voir avec la théorie des groupes, je suis parvenu à faire le lien entre cette conjecture et mes travaux sur l'alternative de Tits uniforme.* » Il encadre aussi avec Terence Tao un thésard qui travaille sur le rapprochement de la théorie des modèles, théorie de logique mathématique très abstraite sans rapport avec les groupes au départ, et des groupes très généraux.

Existe-t-il des domaines des mathématiques qui lui échappent ? Il répond sous forme de boutade : « *En mathématiques, il y a ceux qui ont lu les œuvres de Grothendieck, les* Éléments de géométrie algébrique *et les* Séminaires de géométrie algébrique, *et ceux qui ne les ont pas lus. Je ne les ai pas lus.* » ■ **Philippe Pajot**

Ni frappée, ni administrée par une Banque centrale ou un État, le bitcoin est une crypto-monnaie générée par des algorithmes. Une monnaie virtuelle donc, mais qui a une valeur et permet de faire des achats. © PASCAL SITTLER/RÉA

Spécial BITCOIN

1. La ruée vers l'or numérique

Monnaie libertaire et démocratique qui va révolutionner la finance, invention réservée aux « geeks », outil de transaction rêvé pour la mafia… Après seulement cinq ans d'existence, le Bitcoin fascine et inquiète les gouvernements et le grand public.

PAR **Jean-Philippe Braly,** journaliste.

« *Ne pas y croire, ce serait comme ne pas croire aux réseaux sociaux* », lançait récemment Patrick Oualid, directeur des achats en ligne de Monoprix à propos du Bitcoin, qu'il prévoit d'accepter comme moyen de paiement sur son site d'ici à la fin de l'année [1]. Sa stratégie vise sans doute à prendre une longueur d'avance au cas où les consommateurs se mettraient à adopter en masse cette monnaie virtuelle dont on >>>

La ruée vers l'or numérique

›››› parle tant. Mais pour l'heure, le Bitcoin divise les économistes, inquiète les autorités, affole les spéculateurs… et se retrouve fréquemment à la rubrique des « faits divers ». Pourquoi une telle frénésie ?

Fin 2008. Signé Satoshi Nakamoto, un pseudonyme, un texte publié sur Internet décrit comment les progrès de la cryptographie, alliés à la puissance des protocoles informatiques d'échange pair à pair*, permettraient de concevoir une monnaie purement électronique et complètement décentralisée [2]. Le 3 janvier 2009, l'énigmatique auteur passe à l'acte, et crée ce système de « crypto-monnaie » qu'il baptise « Bitcoin ». Qui est Satoshi Nakamoto ? Personne ne le sait. *« De nombreux indices convergent vers Nick Szabo, chercheur américain spécialiste des monnaies numériques et qui connaît bien la cryptographie,* indique Jean-Paul Delahaye, du laboratoire d'informatique fondamentale de Lille. *Mais ce pseudonyme recouvre peut-être aussi un groupe de personnes. Ce mystère crée une certaine méfiance. »*

Au contraire de son créateur, le Bitcoin, lui, s'est rapidement fait connaître. Il faut dire que ses caractéristiques ont de quoi séduire. Tout d'abord, le système n'est contrôlé par aucune autorité centrale, mais géré collectivement par les détenteurs de bitcoins, qui allouent une partie de la puissance de leur ordinateur au bon fonctionnement du système. *« Décentralisé et sans frontière, il remet donc en question le monopole des États et des banques centrales »,* explique Nicolas Houy, du CNRS, au Groupe d'analyse et de théorie économique Lyon Saint-Étienne. Un aspect libertaire qui a du poids depuis la crise financière des années 2000, et la défiance qu'elle a générée dans le public vis-à-vis du système bancaire.

Ensuite, le protocole mis au point par Satoshi Nakamoto prévoit l'émission de 21 millions de bitcoins, pas un de plus, d'ici à 2140. Impossible donc de faire fonctionner la « planche à billets ». *« Ainsi, il n'y aura jamais d'inflation monétaire avec ce système »,* indique Philippe Herlin, économiste et auteur de *La Révolution du bitcoin et des monnaies complémentaires* [3].

Anonymat et transparence. Au quotidien, les avantages pour l'utilisateur sont également nombreux. Les bitcoins peuvent être échangés rapidement d'un bout à l'autre de la planète, et surtout *« à un tarif imbattable, largement inférieur à ceux des Carte Bleue, des systèmes de paiement PayPal ou autre Western Union »,* ajoute Philippe Herlin. Autre atout apprécié : l'anonymat des transactions, l'identité de l'utilisateur n'étant requise que pour l'échange entre devises classiques et bitcoins.

Par ailleurs, tout paiement en bitcoins est irréversible, ce qui protège les commerçants contre les fraudes par opposition de paiement (en corollaire, l'acheteur risque toutefois que le vendeur ne livre pas l'objet acheté, sans possibilité de réclamation). Côté sécurité, les procédés cryptographiques mis en œuvre empêchent de truquer les comptes, par exemple de dépenser deux fois le même bitcoin ou de s'en créer encore frauduleusement (le vol ou la perte de son porte-monnaie virtuel est toutefois toujours possible). Dernier atout mis en avant par ses promoteurs, la transparence : protocoles de base, algorithmes de cryptographie, programmes liés, transactions, contenu de chaque porte-monnaie virtuel, somme totale de bitcoins émis… tout est public ; et chacun peut proposer des améliorations aux logiciels, dont le code est, lui aussi, public.

Tous ces avantages contribuent à l'ampleur prise par le Bitcoin. Mais il ne faut pas se voiler la face : il attire aussi les spéculateurs. En témoigne son cours qui, parti de rien en 2009, a dépassé les 1 000 dollars fin 2013, année de son réel décollage apparemment lié à la crise bancaire chypriote [fig. 1]. *« Selon une récente enquête, la première motivation à utiliser des bitcoins est d'abord l'investissement et la spéculation [4] »,* confirme Philippe Herlin. À l'heure où nous écrivons ces lignes, un bitcoin s'échange contre environ 300 € ; avec déjà plus de 12 millions de bitcoins en circulation, sa capitalisation totale atteint donc près de 3,6 milliards d'euros.

Certains ont déjà gagné beaucoup d'argent en achetant des bitcoins à très bas prix dès leur création, et en les « minant » quand peu de monde le faisait encore : le « minage » est le gain de bitcoins nouvellement créés par la mise à disposition d'une partie de ses ressources informatiques pour le fonc-

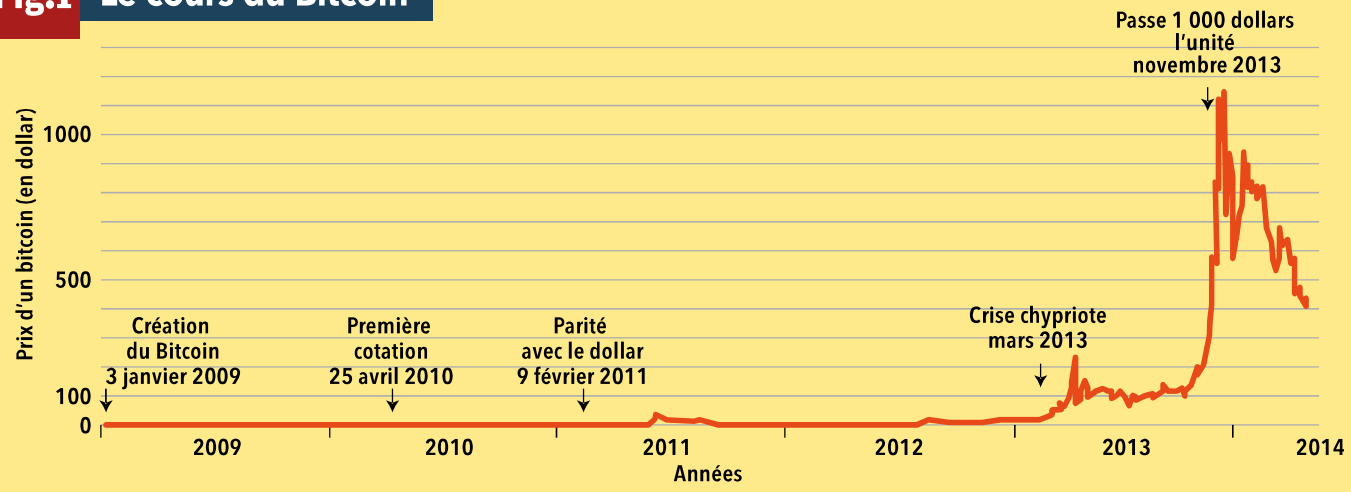
L'arbre qui cache la forêt

Litecoin et Namecoin lancées en 2011, Peercoin en 2012, Ripple et Dogecoin en 2013… plus d'une centaine de crypto-monnaies concurrencent déjà le Bitcoin. Mais leur valorisation est bien moindre. Mi-avril 2014, l'ensemble des Bitcoins représentaient plus de 4 milliards d'euros contre 255 millions pour Litecoin, 44 pour Peercoin, 40 pour Ripple, 27 pour Dogecoin… et 19 millions pour Namecoin. Mais rien n'interdit qu'une autre crypto-monnaie surpasse un jour le Bitcoin grâce à de meilleures caractéristiques : transaction encore plus rapide, anonymat encore plus rigoureux, etc.

L'essentiel

- **LE BITCOIN a été créé en 2009 par un mystérieux Satoshi Nakamoto.**
- **LE SYSTÈME est entièrement autocontrôlé et public, ce qui crée de la confiance.**
- **CERTAINS ÉTATS tentent d'interdire ou de restreindre l'usage de cette « monnaie virtuelle », qu'ils ne contrôlent pas.**

Fig.1 Le cours du Bitcoin



CRÉÉ LE 3 JANVIER 2009, le Bitcoin a atteint la parité avec le dollar deux ans plus tard. Mais c'est la crise chypriote du printemps 2013, où il a servi de valeur refuge, qui lui a fait atteindre 100 dollars. Après une ascension à plus de 1 100 dollars fin 2013, il fluctue actuellement entre 400 et 500 dollars. SOURCE : BLOCKCHAIN.INFO

tionnement du système, en particulier pour la validation des transactions (lire « Bitcoin est-il une valeur sûre ? », p. 72). Par exemple, selon certains chercheurs, l'énigmatique Satoshi Nakamoto détiendrait aujourd'hui 10 % des bitcoins en circulation [5]. Autre exemple emblématique, Khristoffer Kock, étudiant norvégien qui, en revendant une partie des 5 000 bitcoins qu'il avait acquis pour seulement 24 dollars en 2009, a pu s'acheter un appartement dans le centre d'Oslo !

Autre indice de l'engouement pour les bitcoins : la puissance informatique globale consacrée au « minage ». Elle dépasse aujourd'hui 580 000 pétaflops par seconde, soit plus de 17 000 fois celle du plus puissant supercalculateur. Des entreprises se sont même mises à fabriquer des cartes informatiques et des puces spécialisées dont le seul objectif est de « miner » les bitcoins !

Toutefois, le Bitcoin présente encore de sérieuses limites. Premièrement, même si la liste s'allonge de jour en jour, le nombre de sociétés qui l'acceptent en paiement est encore restreint [6]. Mais pour Nicolas Houy, *« le premier écueil qui menace le Bitcoin est sa volatilité. En effet, elle freine son adoption, ce qui crée encore de la volatilité : le système devra sortir de ce cercle vicieux s'il veut s'imposer au plus grand nombre ».*

Interdictions chinoise et russe. Autre entrave à son essor : les réglementations visant à limiter, voire à proscrire, son usage. En décembre 2013, le gouvernement chinois a, par exemple, interdit aux établissements financiers et aux principales plates-formes de paiement en ligne du pays d'utiliser le Bitcoin. La Russie a, quant à elle, carrément interdit toute transaction en bitcoins. *« Toutefois, si le système parvient à s'imposer, ces pays seront obligés de revenir sur leurs décisions »,* prévoit Jean-Paul Delahaye.

Côté confiance, le Bitcoin a également subi quelques revers ces derniers mois. En décembre dernier, la Banque de France publiait une note sur les dangers liés à son développement : aucune garantie de remboursement, utilisation à des fins criminelles (blanchiment d'argent, terrorisme), caractère hautement spéculatif, etc. [7]. Cela faisait suite en particulier à l'affaire Silk Road, place de marché virtuelle où l'on pouvait acheter de la drogue avec des bitcoins, et que le FBI avait fermée en octobre 2013.

En février dernier, une autre affaire a fait la une des journaux : la volatilisation de plusieurs centaines de milliers de bitcoins chez Mt. Gox, une des principales plates-formes d'échange de bitcoins, aujourd'hui en faillite. *« À ce stade, on ne peut pas exclure qu'il s'agisse d'une escroquerie, et non pas d'un simple vol par des pirates informatiques, qui paraît quand même improbable »,* estime Jean-Paul Delahaye. *« Même si elles n'ont rien à voir avec le système Bitcoin lui-même, ces récentes affaires ont été très mauvaises pour son image, ce qui ralentit son adoption et maintient sa forte volatilité. Mais elles n'ont pas fait s'effondrer le cours du bitcoin, ce qui prouve sa solidité »,* ajoute-t-il.

Bien malin donc qui peut prédire ce que deviendra le Bitcoin. Mais force est de constater qu'il a changé l'appréhension des monnaies virtuelles par le public. Aujourd'hui, plus d'une centaine d'autres crypto-monnaies s'en inspirent (lire « L'arbre qui cache la forêt », p. 70). Et certains travaillent déjà à l'adaptation à d'autres applications des protocoles informatiques utilisés, par exemple pour passer des contrats ou gérer des titres de propriétés sans autorité centralisée. ■

* **UN RÉSEAU PAIR À PAIR** permet l'échange et le partage direct de fichiers entre des ordinateurs.

[1] http://tinyurl.com/ln4n678
[2] https://bitcoin.org/bitcoin.pdf
[3] P. Herlin, *La Révolution du bitcoin et des monnaies complémentaires,* Eyrolles/Atlantico, 2013.
[4] [Etude présentée le 13 février 2014 par la société Waykup à la rencontre Paris Bitcoin startups #1
[5] http://tinyurl.com/c59gqet
[6] http://tinyurl.com/q65szg9
[7] http://tinyurl.com/p95n9rz

2. Bitcoin est-il une valeur sûre ?

Acheter un bien avec des bitcoins implique d'obéir à des protocoles cryptographiques à la fois complexes et originaux. Voici les clés de sécurité d'un système dont la popularité ne cesse de croître.

PAR **Olivier Markowitch,**

Charles Cuvelliez,
de l'université libre de Bruxelles,

ET **Étienne Marique,**
conseiller à la cour d'appel de Bruxelles.

L'essentiel

> **LA SÛRETÉ du système Bitcoin repose sur l'usage d'outils cryptographiques appliqué sur les données échangées entre les utilisateurs.**

> **CES OUTILS sont les fonctions de hachage cryptographiques et les signatures numériques.**

> **LA VALIDATION d'une transaction en bitcoins passe aussi par la résolution d'un casse-tête numérique complexe.**

Au mois de février dernier, la plate-forme internet Mt. Gox, qui permet d'échanger des euros contre des bitcoins, a été victime d'une cyberattaque massive : plus de 750 000 bitcoins, représentant une valeur estimée à plusieurs centaines de millions d'euros, ont été dérobés à quelque 125 000 utilisateurs à travers le monde. Cette attaque a eu pour conséquence la fermeture de Mt. Gox. Elle a aussi fort probablement participé à la chute du cours de la devise virtuelle. Elle a, enfin, contribué à la réputation sulfureuse du système Bitcoin, soupçonné de ne pas être assez fiable. À tort.

Des zones d'ombre subsistent concernant cette attaque de Mt. Gox, mais il semblerait que le problème provienne entre autres de la décision du site de ne pas vérifier et protéger l'ensemble des éléments qui forment une transaction. En effet, d'autres plates-formes permettant d'acheter, de vendre et de transférer des bitcoins, comme Bitcoin-Central, respectent les règles de sécurité de manière beaucoup plus stricte et, à ce jour, n'ont connu aucune attaque de ce type. La sûreté du système Bitcoin est d'ailleurs ce qui explique sa popularité croissante depuis sa mise en place en 2009.

Bitcoin, tel qu'il a été conçu par le mystérieux Satoshi Nakamoto (lire « La ruée vers l'or numérique », p. 69), repose sur la cryptographie [1]. Dans son principe général, celle-ci a pour but de rendre incompréhensible, pour qui n'aurait pas la clé de décryptage, un message qui n'a pas vocation à être connu de tous.

Bitcoin utilise deux grands outils cryptographiques. Le premier est la cryptographie asymétrique : au moyen d'un algorithme, on génère une clé privée, qui est connue de son propriétaire seul ; une clé publique, associée mathématiquement à la clé privée, est aussi générée mais elle est mise à disposition de tous. La cryptographie asymétrique permet entre autres la réalisation de signatures numériques, qui garantissent l'intégrité du message ainsi que l'authentification du signataire. Pour cela, celui-ci signe son message en utilisant sa clé privée ; quiconque est en possession de la clé publique associée peut vérifier la validité de cette signature.

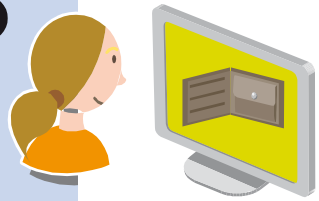
Empreinte unique. L'autre outil utilisé par le système Bitcoin, ce sont les fonctions de hachage cryptographiques. Une fonction de hachage est un algorithme mathématique qui permet d'associer un ensemble de données à une « empreinte » unique et de petite taille. Le hachage doit pouvoir être produit très rapidement, mais il doit être excessivement difficile de retrouver des données de départ à partir d'une empreinte donnée.

Comment ces deux outils sont-ils utilisés dans le cadre d'une transaction Bitcoin ? Avant d'effectuer des transactions en bitcoins, le préalable est évidemment d'en acheter. Pour cela, il suffit de vous inscrire et d'ouvrir un compte sur un site dédié, tel Bitcoin-Central. Les sites les plus sérieux ›››

© DR – FABRICE DEBATTY/IBPT – DR

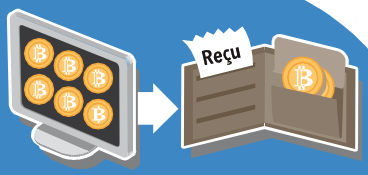
Les étapes d'une transaction en bitcoins

ACHETER DES BITCOINS

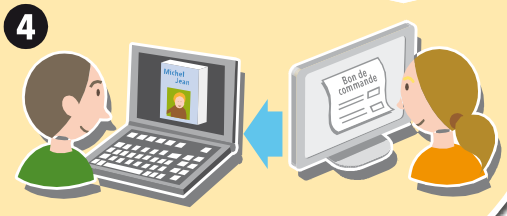
1

Alice crée un portefeuille numérique.

2

Alice génère un couple de clés de cryptage : une clé publique (en jaune) et une clé privée (en rouge).

3


Alice achète des bitcoins sur un site web. Elle range aussi dans son portefeuille la référence de la transaction.

4


Alice passe commande d'un livre auprès de Bob.

5

Bob envoie à Alice l'adresse à laquelle elle doit transférer les bitcoins.

6

Alice rassemble l'adresse de Bob, le montant de la transaction et les références des transactions précédentes.

PASSER COMMANDE

7

À partir des éléments qu'elle a rassemblés et de sa clé privée, Alice produit une signature numérique.

8

Alice envoie au réseau la transaction signée et sa clé publique.

9

La transaction et la clé publique sont mises avec d'autres transactions et leurs clés publiques dans un bloc.

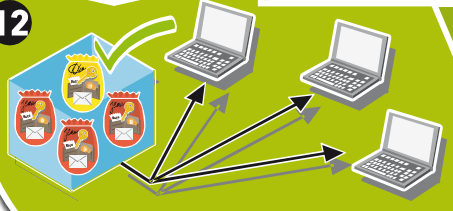
10

Des volontaires, les « mineurs », vérifient l'authenticité de la signature d'Alice à l'aide de la clé publique.

11

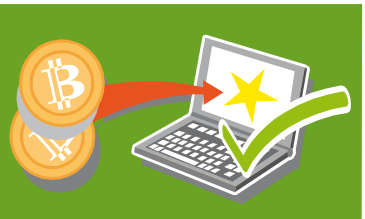
Puis ils tentent de résoudre un casse-tête numérique pour chaque bloc.

VÉRIFIER ET VALIDER LA TRANSACTION

12

Le premier mineur qui a résolu le casse-tête envoie la solution à tous les autres, qui la vérifient.

13

Si la solution est juste, ils valident le bloc et donc la transaction entre Alice et Bob.

14

Le mineur qui a résolu le casse-tête numérique perçoit une récompense en bitcoins.

Bitcoin est-il une valeur sûre ?

›››› exigent que vous leur fournissiez une preuve de votre identité, afin d'éviter les risques de blanchiment d'argent. Vous versez alors des euros sur ce compte *via* votre banque, pour autant que celle-ci accepte le versement vers des comptes appartenant à des sites ouvertement connus pour être des plates-formes d'échange de bitcoins. Et vous introduisez alors une demande d'achat de bitcoins, en fixant un seuil en euros sur leur valeur d'achat. Vous devez ensuite créer un portefeuille numérique où déposer votre argent virtuel. Ce peut être un programme que vous installez sur votre ordinateur. Vous pouvez aussi décider de laisser ce portefeuille sur un site internet.

Vous pouvez associer une ou plusieurs adresses Bitcoin à ce portefeuille. Chaque adresse est l'équivalent d'un compte en banque, où l'on verse le ou les bitcoins qui font l'objet d'une transaction. Une adresse prend la forme d'une suite de chiffres et de lettres, de longueur variable. Pour en créer une, vous devez utiliser un algorithme qui génère une clé publique. C'est en hachant cette clé publique que vous obtenez une adresse Bitcoin. Le même algorithme génère simultanément une clé privée, associée à la clé publique. Vous seul y avez accès. Elle est d'ailleurs rangée dans votre portefeuille numérique.

Une fois que vous possédez un portefeuille et, au moins, une adresse Bitcoin créditée, vous voilà prêt à effectuer une transaction. Imaginons maintenant que vous souhaitiez acheter un livre auprès d'un autre utilisateur du système, que nous appellerons Bob. Une fois votre ordre de commande passé, la transaction suit un certain nombre d'étapes (lire « Les étapes d'une transaction en bitcoins », p. 73), qui sont autant de sécurités pour éviter la fraude.

Mineurs volontaires. Quand Bob reçoit l'ordre de commande, il vous signale, en retour, à quelle adresse Bitcoin vous devez transférer la somme en bitcoins. Une fois que vous avez reçu l'adresse de Bob, vous rassemblez toutes les autres données nécessaires à la transaction. Cela comprend le montant en bitcoins de la transaction et les références des transactions précédentes, prouvant que vous possédez bien les bitcoins que vous allez dépenser. Quatrième et

À Vancouver, au Canada, on peut payer son café en bitcoins avec son smartphone, depuis octobre dernier. C'est possible grâce au premier distributeur de billets convertissant les monnaies officielles en bitcoins. © DEBORAH JONES/AFP

dernier élément de cette transaction : votre signature numérique, certifiant que vous êtes bien l'émetteur de l'ordre de commande. Là encore, cette signature est produite par un algorithme, qui la calcule à partir des données à signer et de votre clé privée, qui est associée à la clé publique que vous avez utilisée pour générer l'adresse où se trouvent les bitcoins que vous allez dépenser dans la transaction avec Bob. Puis vous transmettez aux membres du réseau toutes ces informations, accompagnées de la clé publique de l'adresse où sont stockés vos bitcoins.

Tous les utilisateurs du réseau Bitcoin doivent maintenant vérifier et valider la transaction ainsi construite. Car, et c'est là l'autre originalité du système Bitcoin, celui-ci n'est pas géré par une autorité centrale, mais par ses membres, dans ce qu'on appelle un réseau pair à pair*. Dans les faits, tous les autres utilisateurs ne vérifient pas toutes les transactions : il s'agit de volontaires, le plus souvent rassemblés en groupes. Ces volontaires sont appelés « mineurs », en référence aux chercheurs d'or (car leur activité crée des bitcoins), et le processus de validation s'appelle le « minage ».

Casse-tête numérique. Les mineurs rassemblent d'abord un certain nombre de transactions, dont la vôtre, dans un bloc. Pour vérifier la transaction entre Bob et vous, ils vont se servir de la clé publique que vous avez jointe à la transaction – et qui correspond à l'adresse où sont stockés les bitcoins que vous allez dépenser. En utilisant un algorithme, ils vont ainsi vérifier la correspondance entre la clé publique et votre signature : si l'algorithme répond vrai, la signature est valide ; s'il répond faux, la signature ne l'est pas.

Une fois qu'ils ont vérifié votre transaction, et toutes les autres transactions contenues dans le bloc, les mineurs doivent encore franchir une étape : celle de la validation. Le protocole Bitcoin

* **UN RÉSEAU PAIR À PAIR** permet l'échange et le partage direct de fichiers entre des ordinateurs.

« Face aux bitcoins, les États sont partagés entre méfiance, neutralité et hostilité »

© DR

Charles Cuvelliez, de l'université libre de Bruxelles, en Belgique, est membre du collège exécutif du régulateur des communications électroniques, l'institut belge des services postaux et des télécommunications.

Le système Bitcoin peut-il être considéré comme une monnaie virtuelle ?

C.C. Oui, si on élargit la définition de monnaie virtuelle donnée par la Banque centrale européenne (BCE), qui parle d'une monnaie non régulée, émise et contrôlée par ses développeurs, et utilisée au sein d'une communauté virtuelle [1]. En effet, les développeurs de Bitcoin ne le contrôlent plus – ils sont remplacés par les utilisateurs et par la cryptographie – et le système est utilisé dans tout Internet, non limité à une communauté. Autre élément dans la définition de la BCE : une monnaie virtuelle n'a pas vocation à être échangée contre de la vraie monnaie, or c'est ce qu'il se passe avec Bitcoin – et qui est à l'origine de ses malheurs. Le Bitcoin n'est pas non plus une monnaie électronique, bien cadrée par des directives européennes, qui la voient comme une alternative aux dépôts bancaires avec un émetteur ayant un statut proche d'une banque. On achète du bitcoin : il s'agit donc plutôt d'un bien virtuel (et... taxable), qui est utilisé comme moyen de paiement.

Pourquoi certains pays voient-ils le développement de ce système d'un mauvais œil ?

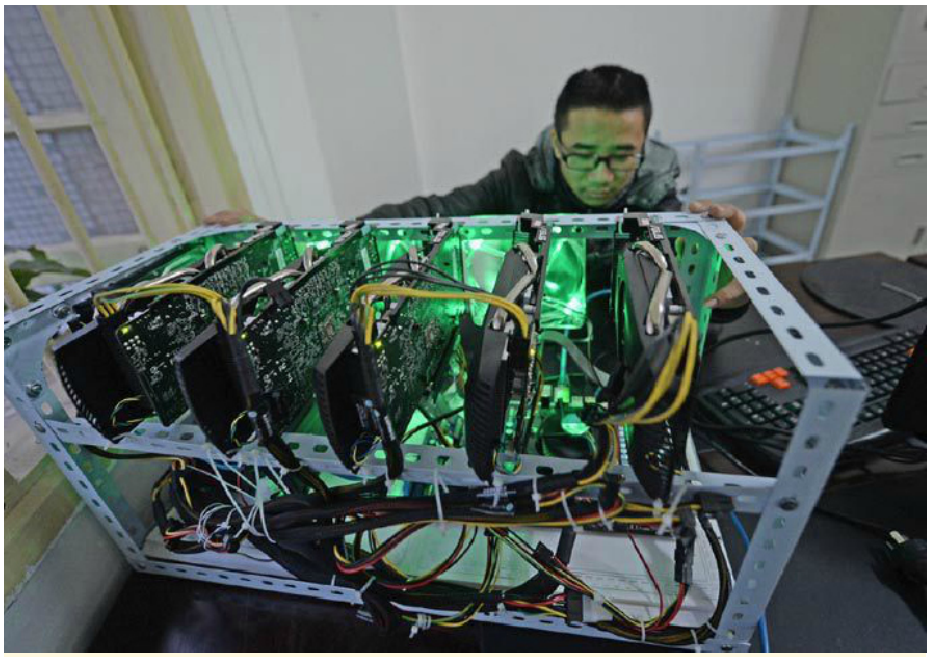
C.C. Certains États se méfient du système Bitcoin car il s'agit d'une monnaie qui se développe en dehors du contrôle des États et s'autorégule entre utilisateurs. Mais ce sont les cellules de lutte contre le blanchiment et le financement du terrorisme qui s'inquiètent le plus : regroupées au niveau mondial au sein du Groupe d'action financière, elles suivent le Bitcoin qui, combiné à d'autres techniques d'anonymat sur Internet, est redoutable pour blanchir l'argent, financer la criminalité, etc. L'exemple de Silk Road, hypermarché en ligne de la drogue et du trafic d'armes, qui était inondé de transactions factices pour noyer celles réelles en Bitcoin, l'a illustré, avant que le site soit fermé par le FBI. Mais on reconnaît aussi l'innovation qu'il y a derrière Bitcoin, et ses avantages : les transactions en bitcoins évitent des frais de change et de transfert. Le système pourrait ainsi faciliter la vie des pays sans réseaux bancaires.

Comment essayent-ils de réagir face à ce phénomène ?

C.C. Les pays réagissent pour ou contre en ordre dispersé. La plupart voient le Bitcoin comme un bien virtuel, afin de pouvoir le taxer au cas où : c'est le cas de l'Australie, du Canada ou des Pays-Bas. D'autres pays sont neutres car le volume des échanges en bitcoins reste faible, comme la Belgique ou la France – même si cette dernière a émis une mise en garde, fin 2013, sur les dangers des monnaies virtuelles [2]. Certains États sont plus radicaux. La Chine, par exemple, a totalement interdit Bitcoin, comme tout autre moyen potentiel de contourner les taux de change du yuan, qui sont fixés par la banque de Chine et non par les marchés. La Chine craint aussi que Bitcoin alimente le système bancaire local et parallèle, certes en déconfiture, qui s'est créé face à la mainmise de l'État sur les banques officielles. L'Argentine n'aime pas trop Bitcoin non plus : on la comprend, elle qui est à la merci des fonds vautours sur sa dette souveraine et subit la fuite des capitaux. ■ **Propos recueillis par Vincent Glavieux**

[1] Banque centrale européenne, http://bit.ly/1i8pbul, 2012.
[2] Banque de France, http://bit.ly/1biNQIR, 2013.

Bitcoin est-il une valeur sûre ?



© © RAN WEN/FEATURECHINA/ROPI-RÉA

La compagnie Landminers, en Chine, a mis au point des cartes informatiques spécialement conçues pour valider les transactions Bitcoin. En échange de ce service, elle reçoit des récompenses en bitcoins.

›››› impose la résolution d'un casse-tête numérique. Là, c'est le hasard qui va décider lequel des mineurs trouvera la solution. Dans chaque bloc à valider, on trouve en effet un certain nombre de transactions, mais aussi une référence aux derniers blocs de transactions juste précédemment validés, ainsi qu'un nombre entier *x*, dont il faut trouver la valeur, et qu'on ajoute à la création du bloc de transactions. Le calcul à réaliser pour trouver la valeur de cet entier *x* doit être tel que le résultat du hachage de toutes les informations formant le bloc – y compris la valeur *x* – soit inférieur à un nombre publiquement connu, appelé « cible ».

Tous les volontaires vont donc essayer de trouver ce *x*, ce qui est loin d'être simple. En effet, comme nous l'avons déjà dit, les fonctions de hachage cryptographiques ne sont pas inversibles : il est excessivement difficile de retrouver des données de départ à partir d'une empreinte donnée – ici, les valeurs plus petites que le nombre cible. Il n'y a donc aucun indice qui permette de guider le choix de *x*. Le seul moyen de le calculer est de tester des valeurs au hasard, ce qui prend un temps considérable et consomme une grande puissance de calcul.

Afin de compenser les progrès technologiques, qui rendent les calculs de plus en plus rapides, la valeur de la cible diminue régulièrement dans le temps. Cela permet de maintenir à un niveau constant la difficulté des casse-tête numériques, dont la résolution doit prendre dix minutes environ pour l'ensemble du réseau.

Lorsqu'un volontaire a résolu un casse-tête numérique, il transmet le bloc de transactions complet, y compris l'entier *x*, à tous les membres du réseau Bitcoin. Les autres utilisateurs vérifient que ce bloc résout bien le casse-tête. Cette validation, au contraire de la résolution du casse-tête numérique, est très rapide. Chaque membre du réseau met à jour, *via* cette validation, sa chaîne de blocs quasi simultanément en y intégrant ce bloc nouvellement validé.

Système de récompense. Comme le réseau pair à pair joue le rôle de régulateur (qui est donc ici décentralisé), il ne faut rien de plus pour que la transaction entre Bob et vous soit effective. En effet, en validant le bloc où se trouve votre transaction, les membres du réseau pair à pair valident aussi le fait que les bitcoins que vous avez transférés sont dorénavant « dans les mains » de Bob. Dans les faits, les bitcoins ne sont jamais « physiquement » dans les mains de qui que ce soit : c'est l'information partagée et dupliquée au sein du réseau pair à pair qui indique où se trouvent virtuellement les bitcoins. La seule chose qu'un propriétaire de bitcoins possède est la clé privée qui lui permet de signer numériquement des transactions au cours desquelles il peut dépenser les bitcoins qu'il a précédemment reçus.

De son côté, le mineur qui parvient à résoudre le premier un casse-tête numérique obtient une récompense : actuellement, elle s'élève à 25 bitcoins nouvellement créés. Le protocole Bitcoin est tel que tous les 210 000 blocs validés, la récompense en bitcoins est divisée par deux. La plus petite unité admise d'un bitcoin étant 10^{-8} bitcoin, aussi appelé un « Satoshi », le moment où la récompense deviendra inférieure à un Satoshi est lointain, mais il arrivera. Cela aura pour conséquence l'arrêt de la production de bitcoins. Il faudra alors trouver un autre moyen de rémunérer les mineurs. Cela consistera certainement à inclure, dans les transactions, des montants en bitcoins légèrement supérieurs à la somme requise : ce surplus sera la commission qui sera transmise au(x) mineur(s) chanceux. ■

[1] S. Nakamoto, https://bitcoin.org/bitcoin.pdf, 2009.

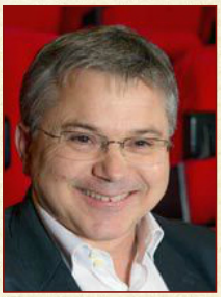
Pour en savoir plus

> **https://bitcoin.org/fr**
Le site de Bitcoin.

> **http://www.e-ducat.fr/topics/bitcoin**
Un blog consacré au système Bitcoin et à son fonctionnement.

idées

• **Les livres** p. 87
La sélection de la rédaction de *La Recherche*
• **L'agenda** p. 96
Les conférences, les expositions
• **Curiosités** p. 98
Les insolites de l'actualité scientifique



78 **L'entretien du mois**
avec Pierre-Benoît Joly
« La biologie de synthèse a besoin de la sociologie »
Propos recueillis par Marie-Laure Théodule

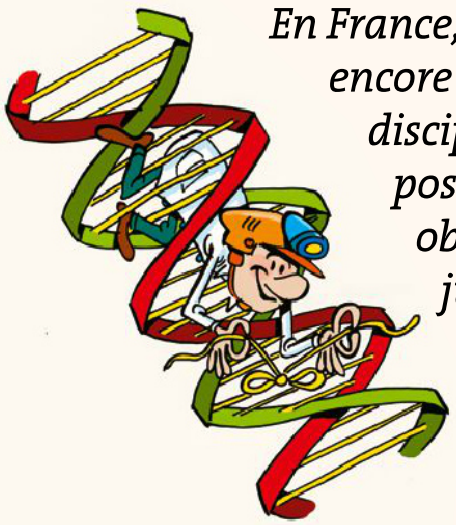
82 **Déchiffrage**
Solde migratoire zéro dans le monde en 2100
Par Hervé Le Bras

83 **Le grand débat**
Faut-il craindre la fin de l'écriture manuscrite ?
Avec Jean-Luc Velay et Philippe Artières

92 **Histoire de science**
1914 : Carrel et Dakin se battent pour l'antisepsie
Par Éric Sartori

Synthèse et vie artificielle

En recréant l'un des 16 chromosomes de la levure de boulanger, (lire p. 20), la biologie de synthèse a franchi un pas symbolique. C'est la première fois qu'un chromosome d'une cellule dotée d'un noyau est reconstitué artificiellement. L'avancée illustre le développement d'un domaine en pleine émergence, construit autour d'une promesse : celle de concevoir des organismes synthétiques utiles à l'homme. Ce développement exige aussi d'y associer la société civile qui, dès lors que l'on touche au vivant, émet des craintes classiques et légitimes.



En France, si le domaine n'a pas encore gagné ses galons de discipline stricto sensu, *il possède depuis 2012 un observatoire qui entend justement être un lieu d'échange pour réfléchir à son impact sur la société. En amont !*

Hélène Le Meur

© ILLUSTRATION REMI MALINGREY

L'entretien du mois

La biologie de synthèse ambitionne de créer des organismes artificiels utiles à l'homme. Pour le sociologue ***Pierre-Benoît Joly,*** *il est impératif que les sciences humaines et sociales accompagnent son développement pour éviter un désintérêt, ou un rejet de cette discipline en émergence.*

« La biologie de synthèse a besoin de la sociologie »

Pierre-Benoît Joly, économiste et sociologue, est directeur de recherche à l'INRA et dirige l'Institut francilien recherche innovation et société. Ce spécialiste de l'étude des sciences et des techniques a écrit avec Christian Bonneuil *Sciences, techniques et société,* ouvrage paru en 2013 aux éditions La Découverte.
Il est également coauteur de « Biologie de synthèse : conditions d'un dialogue avec la société », rapport commandé en 2011 par le ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche.

LA RECHERCHE : Quand le concept de biologie de synthèse est-il apparu ?

PIERRE-BENOÎT JOLY : L'expression a été utilisée pour la première fois au début du XX[e] siècle par un chimiste français, Stéphane Leduc. Ce dernier réalise alors des expériences où il tente de créer des cellules artificielles pour mieux comprendre le vivant. Et il les décrit dans *La Biologie synthétique,* ouvrage publié en 1912. Il s'en suit une série de travaux tout au long du XX[e] siècle, dont l'objectif est de fabriquer une cellule primitive, une protocellule.
Mais, un tout autre courant va naître au début du XXI[e] siècle à la suite des avancées majeures de la génomique. On peut situer son commencement en 2004, année où une fondation nommée « BioBricks » organise au MIT, aux États-Unis, la conférence Biologie synthétique 1.0, qui va réunir 500 personnes dès sa première édition.

En quoi ce courant se démarque-t-il du précédent ?

P.-B.J. L'objectif principal n'est plus de comprendre le vivant, mais de fabriquer des organismes artificiels dotés de fonctions complexes permettant de résoudre certains problèmes. Ils auront par exemple un meilleur rendement énergétique que des organismes naturels ou bien ils synthétiseront de nouvelles molécules thérapeutiques. Pour cela, la biologie de synthèse s'appuie sur les outils de la génomique : séquençage des génomes à grande échelle, synthèse et assemblage de séquences d'ADN, etc. Mais elle ambitionne d'aller beaucoup plus loin en utilisant les méthodes de l'ingénieur pour produire plus vite et à moindre coût des organismes artificiels. Car aujourd'hui on sait seulement introduire de manière artisanale quelques gènes dans une cellule pour fabriquer des organismes génétiquement modifiés (OGM).

Qu'apportent de plus les méthodes de l'ingénieur ?

P.-B.J. Comme il s'agit d'introduire une cascade de gènes voire un génome entier dans une cellule, l'idée est de s'aider des outils mathématiques et informatiques utilisés par les ingénieurs pour comprendre et modéliser les interactions de ces gènes. À terme, on espère concevoir des systèmes biologiques à partir de composants standardisés et avec des méthodes elles-mêmes standardisées, comme on le fait en électronique. Concrètement, on programme le développement d'un nouveau système biologique en quatre phases : la conception (développement d'un modèle mathématique du système biologique et simulation), la construction avec la volonté de standardiser les procédés et les composants pour gagner du temps, puis la mise en œuvre et la validation. Cette dernière étape peut conduire à réviser la modélisation initiale.

Cela a-t-il déjà donné des résultats ?

P.-B.J. Il y a eu des avancées spectaculaires. En suivant une approche dite « top-down » – concevoir un génome minimal auquel on pourra ajouter en fonction des besoins des séquences de gènes conçues par ordinateur – le biologiste américain Craig Venter a créé en 2010 une bactérie au génome synthétique de 1,08 million de paires de bases (l'enchaînement des lettres qui constituent l'alphabet de l'ADN) [1]. Et en mars 2014, une équipe internationale dirigée par Jef Boeke, de l'université de New York, a réussi à synthétiser l'un des seize chromosomes de la levure du boulanger [2]. C'est une étape cruciale vers la synthèse du génome d'un eucaryote, une forme >>>

© PHOTOS ZYR RÉALISÉES AU CNAM AVEC LEUR AIMABLE AUTORISATION

L'entretien du mois

Pierre-Benoît Joly

« La biologie de synthèse a besoin de la sociologie »

>>> du vivant bien plus complexe que de simples bactéries. Une autre approche dite « bottum-up » consiste à standardiser des séquences de gènes dans le but d'appareiller des bactéries ou des levures avec ces briques. À l'origine de cette démarche, la Fondation BioBricks a créé une base de données de séquences qu'elle met à la disposition de la communauté scientifique en accès libre, à l'image des logiciels en open source. Elle a lancé le concours international Igem destiné aux étudiants de premier cycle universitaire afin qu'ils conçoivent des systèmes biologiques artificiels à partir de ces briques.

Ce concours a-t-il un effet d'entraînement ?

P.-B.J. Il stimule la créativité des étudiants avec son approche à la fois boy-scout et branchée. Pour concourir, il faut constituer une équipe pluridisciplinaire incluant au moins un spécialiste de sciences humaines, présenter un site web, un concept voire un prototype. En 2013, pour la première fois, une équipe française soutenue par le Centre de recherche interdisciplinaire du biologiste François Taddei, de l'université Paris-Descartes, a remporté le prix. Ils ont montré comment une bactérie de laboratoire pouvait accélérer la détection de molécules contre la tuberculose [3]. En parallèle, avec une étude sur la parité homme/femme dans la recherche, ils ont révélé que les équipes Igem, qui respectent le plus la parité, sont aussi celles qui obtiennent les meilleurs résultats au concours.

Au-delà de ces démarches pionnières, y a-t-il déjà des réalisations commerciales ?

P.-B.J. La réponse à votre question est l'objet d'une polémique. L'équipe de Jay Keasling de l'université de Californie, à Berkeley aux États-Unis, a réussi en 2003 à transférer dans des bactéries et des levures les douze gènes de l'artémisinine, molécule antipaludéenne naturellement synthétisée par une plante, l'armoise. Depuis, le processus de production est en cours d'industrialisation chez Sanofi Aventis. Certains, dont Jay Keasling, considèrent qu'il s'agit du premier produit de la biologie de synthèse. Mais d'autres, même s'ils saluent l'exploit (réussir à transférer douze gènes soit bien plus qu'auparavant) font remarquer à raison que la méthode employée est finalement assez classique. Chaque gène a été introduit un à un « à la main » sans recourir aux méthodes prônées par la biologie de synthèse, censées rendre ce travail beaucoup plus facile et rapide, donc moins coûteux.

Des sociologues ont été associés dès le départ à ce domaine. Pourquoi ?

P.-B.J. Beaucoup de biologistes ont été traumatisés par les craintes suscitées par les OGM. Cela a conduit à favoriser dès le départ une meilleure interaction entre la biologie synthétique et les sciences humaines et sociales, notamment la sociologie. Cette démarche s'inscrit dans le cadre des bonnes pratiques du financement de la recherche, lancées avec le projet de séquençage du génome humain au début des années 1990 et généralisées depuis lors au niveau international : tout programme de recherche touchant au vivant doit consacrer de 3 % à 5 % de ses ressources aux aspects éthiques, légaux et sociaux. On pense ainsi renforcer l'acceptabilité de la nouveauté.

Comment cela se traduit-il concrètement ?

P.-B.J. Dans les pays anglo-saxons, certains sociologues sont « embarqués » : ils travaillent au côté des biologistes au sein de leurs laboratoires. Ainsi, au Royaume-Uni, une sociologue française, Claire Marris, est actuellement embarquée dans un programme de recherche interdisciplinaire qui associe deux établissements londoniens l'Imperial College, pour la biologie, et King's College pour les sciences humaines. Son travail porte en particulier sur les questions de risque et de propriété intellectuelle. Dans ce cadre, elle a récemment organisé un colloque sur le thème : « L'open source en biologie de synthèse ». Autre exemple, aux États-Unis, l'anthropologue américain Paul Rabinow a été embarqué dans SynBERC, consortium dédié à la biologie de synthèse lancé en 2006 par Jay Keasling à l'université de Californie. Mais ce projet s'est terminé par un conflit.

Que s'est-il passé ?

P.-B.J. Paul Rabinow était censé contribuer à l'établissement de nouvelles règles concernant la biosécurité ou l'éthique de la recherche en observant les chercheurs associés à SynBERC et en interagissant avec eux. Or son projet n'a jamais abouti. Selon les biologistes, Paul Rabinow se contentait d'observer sans vraiment rien produire d'original. Selon ce dernier, ses propositions étaient refusées parce qu'elles impliquaient des changements de pratiques qui auraient pu retarder les chercheurs et les handicaper dans la compétition internationale. Au-delà de la polémique, cet exemple est révélateur de la difficulté qu'il y a à faire travailler ensemble biologistes et sociologues.

Et vous, avez-vous une approche différente ?

P.-B.J. Dans mon laboratoire, nous étudions la biologie de synthèse en ayant recours aux outils classiques des sciences sociales. Par exemple, nous utilisons la bibliométrie, et des enquêtes et des observations sur le terrain afin de saisir les caractéristiques de ce champ émergent. Nous avons montré qu'il est de petite dimension : environ 3 000 articles ont été publiés au total sur le sujet depuis environ dix ans, contre plusieurs millions pour les nanosciences et les nanotechnologies ! Mais le taux de croissance des publications est très élevé, de 20 % à 30 % par an. Cependant, sur les 10 000 auteurs qui apparaissent dans le corpus, une minorité est spécialisée en biologie de synthèse : 70 % ont publié une seule fois sur le sujet. En revanche, les 100 articles les plus cités appartiennent bien au domaine, car leurs auteurs travaillent dans des laboratoires états-uniens, développent des approches bottom-up et sont rattachés à un noyau d'institutions qui jouent un rôle crucial dans la structuration de ce domaine, le concours Igem, les conférences, la Fondation BioBricks, etc. Le champ a donc déjà une forte autonomie.

En France, sans une dimension institutionnelle, la biologie de synthèse n'accédera pas au rang de discipline

Mais s'agit-il d'une discipline à part entière ?

P.-B.J. C'est un champ avec beaucoup d'intermittents qui viennent d'autres domaines que la biologie (informatique, mathématiques, ingénierie), et caractérisé par l'importance des recherches liées aux applications. Cela ne suffit pas pour en faire une discipline à part entière. Il lui manque des caractéristiques institutionnelles : un enseignement spécifique, des diplômes, des professeurs, une société savante, des colloques. En France, vous ne pouvez pas dire qu'une discipline existe si elle ne possède pas ces caractéristiques. C'est différent dans les pays anglo-saxons, où le verrou institutionnel est moins fort. Le second problème est qu'une discipline scientifique se construit en général autour d'une énigme centrale à résoudre. La biologie synthétique se construit, elle, autour d'une promesse.

Autour d'une promesse, que voulez-vous dire ?

P.-B.J. La promesse porte sur la santé, l'énergie, la chimie verte et l'environnement avec l'objectif de concevoir des molécules synthétiques pour tous ces secteurs. C'est pourquoi des scientifiques considèrent qu'il ne s'agit pas d'une science, mais d'une technologie qui s'inscrit dans la droite ligne des biotechnologies. Certains vont jusqu'à dire que la biologie de synthèse n'existe pas. Au contraire, ceux qui y croient prétendent qu'elle va révolutionner le génie génétique en le rendant plus simple, plus accessible et plus créatif. En tant que sociologue, nous constatons que science et technologie sont tellement imbriquées dans ce domaine qu'on peut le considérer comme une « technoscience ».

La biologie de synthèse n'est-elle pas un peu survendue ?

P.-B.J. Son ambition est si élevée que cela peut en effet générer des effets pervers. Pour avoir des crédits on fait miroiter des applications utiles à l'homme. Si ces attentes ne sont pas satisfaites, on provoquera des déceptions, qui affecteront en retour le domaine. Autre exemple, le champ se développe dans l'idée que la seule source de solutions aux grands problèmes actuels de la planète, c'est la science et la technologie. Or il faut aussi des transformations sociales. Ainsi, on peut avoir une science médicale qui progresse et des conditions d'accès aux soins qui se dégradent, comme aux États-Unis. En résumé, la biologie de synthèse suscite des attentes mais aussi des craintes, qui sont toutes démesurées.

Certaines craintes ne sont-elles pas justifiées ?

P.-B.J. La biologie de synthèse suscite trois types de craintes classiques dès que l'on touche au vivant : les risques de contamination et de bioterrorisme, les dangers d'ordre plus ontologique qu'il y aurait à réduire le vivant à des machines et à brouiller les frontières entre nature et artifice, et enfin les questions liées aux brevets sur le vivant. Comme ce champ est en émergence, il est trop tôt pour dire si ces craintes sont justifiées. On peut reconnaître qu'elles sont légitimes. Pour en tenir compte, le ministre de l'Enseignement supérieur et de la Recherche a créé en France en 2012 un observatoire de la biologie de synthèse [4]. C'est un lieu d'échange pluridisciplinaire, auquel je collabore. Nous essayons d'associer la société civile à l'émergence du domaine afin de réfléchir à l'impact de son développement sur la société. Il ne faut pas attendre que les chercheurs se mettent d'accord sur ce qu'est la biologie de synthèse pour mener ce type de débat. Au contraire !

Propos recueillis par Marie-Laure Théodule

[1] C. Klingler, « Inventer des génomes sur mesure », *La Recherche*, octobre 2010, n° 445, p. 40.
[2] E. Pennisi, *Science, 343*, 1429, 2014.
[3] A. Lefebvre Balleydier, « Les Français, champions des bactéries », *Les Dossiers de La Recherche*, avril-mai 2014, n° 8, p. 66.
[4] http://biologie-synthese.cnam.fr

Pour en savoir plus

> Pierre-Benoit Joly et Christian Bonneuil, *Sciences, Techniques et Société*, La Découverte, 2013.

> *La Biologie de synthèse entre sciences et société, Médecine/sciences, vol. 29*, hors-série n °2, mai 2013.

> François Képès, *La Biologie de synthèse, plus forte que la Nature ?* Le Pommier, 2011.

> Stéphane Leduc, *La Biologie synthétique, étude de biophysique*, A. Poinat, 1912. (Accessible en ligne sur : http://peiresc.org/bstitre.htm)

Déchiffrage

Solde migratoire zéro dans le monde en 2100

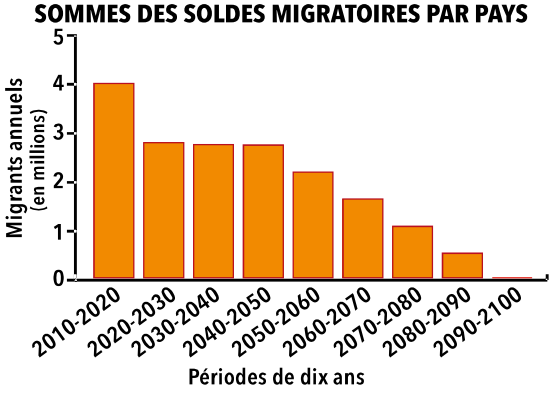
Les projections des Nations unies indiquent sans sourciller que les flux migratoires seront à l'équilibre dans tous les pays membres en 2100. Une prévision qui relève plus de l'idéologie que de la rigueur scientifique.

Par **Hervé Le Bras,** démographe, professeur à l'École des hautes études en sciences sociales.

Selon les Nations unies, le solde migratoire, différence entre nombre d'émigrés et d'immigrés, sera égal à zéro dans les 196 pays membres en 2100. Comment cet organisme international parvient-il à un chiffre aussi surprenant ? En fait, la méthode de projection est la même que celle utilisée pour annoncer 10,9 milliards d'humains en 2100. D'où l'intérêt de s'intéresser à cette démarche.

Les Nations unies commencent par faire des projections séparées pour la population des pays membres. Pour cela, elles émettent des hypothèses sur l'évolution de la fécondité, de la mortalité et de chaque pays jusqu'en 2100 en s'inspirant des travaux menés localement. Elles s'intéressent aussi au solde migratoire, mais l'exercice est plus délicat : les personnes qui sortent d'un pays entrent dans un autre, donc à l'échelle mondiale, logiquement, le total des soldes migratoires négatifs doit égaler le total des soldes migratoires positifs. Or les migrations sont difficiles à anticiper, car elles dépendent de facteurs politiques et économiques souvent imprévus sinon imprévisibles. Ainsi, qui aurait imaginé que l'Italie, l'Espagne et le Portugal passeraient du statut de pays d'émigration massive à celui de pays d'immigration massive dans les années 1980 ? Et que le Portugal perdrait plus de 200 000 résidents depuis la crise financière de 2008 ?

Compte tenu de ces difficultés, l'estimation des migrations par les Nations unies a de quoi surprendre. Le total des soldes migratoires positifs de tous les pays approchait les 6 millions de personnes annuellement entre 2000 et 2010, dont environ 900 000 pour l'Union européenne. Selon les projections, il baisserait à 2,8 millions par an entre 2020 et 2050, puis à 1,4 million entre 2060 et 2080 pour atteindre zéro en 2100. Cela ne signifie pas qu'il n'y aurait plus de migration à cette date. Mais que l'on aurait atteint l'équilibre entre le nombre des entrées et celui des sorties dans chacun des 196 pays. Voilà de quoi rassurer ceux qui craignent l'invasion de leur pays par des étrangers venus de régions en forte croissance démographique. Mais voilà de quoi inquiéter inversement les États-Unis, le Canada, l'Australie et l'Allemagne dont la croissance économique dépend de l'immigration. Et de quoi stupéfier enfin les démographes qui ne voient pas par quel miracle on atteindrait un tel équilibre.



LES PROJECTIONS des Nations unies indiquent une lente diminution du total annuel des soldes migratoires par pays : il passe de 4 millions en 2010-2020 à moins de 2 millions en 2060 pour atteindre 0 en 2100.

Idéologie. En fait, les Nations unies ne peuvent pas faire autrement ! Leur mission est d'assurer la paix dans le monde. Les soldes migratoires leur paraissent le résultat de déséquilibres : guerres civiles ou internationales, déplacements forcés, isolation dans des camps de réfugiés, nettoyages ethniques, drainage des cerveaux. Admettre que ces déséquilibres existeraient encore en 2100 reviendrait à nier la contribution des Nations unies à la pacification du monde. Leur projection ne s'appuie donc pas sur des faits empiriques mais sur leur idéologie. Il est à craindre qu'il en soit de même pour leurs projections de natalité et de mortalité. Par exemple, comment peuvent-ils annoncer que d'ici à 2100, la fécondité descendra de 6,5 enfants par femme à 1,75 en Afghanistan et remontera de 1,25 à 1,85 au Japon. Plus largement le soupçon idéologique doit être porté sur toute prévision ou projection à long terme. Dis-moi qui tu es, je te dirai ce que tu prédiras ! ■

SOURCE : NATIONS UNIES

L'an dernier, plusieurs États américains ont décidé que l'enseignement de l'écriture scripte, semblable à celle d'un clavier, était prioritaire sur celui de l'écriture cursive. Avec des risques pour l'apprentissage de la lecture, selon certains spécialistes.

Faut-il craindre la fin de l'écriture manuscrite ?

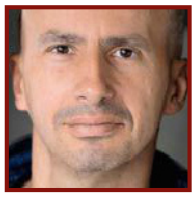
Sachant qu'enfants et adultes utilisent de plus en plus stylets ou claviers d'ordinateurs pour écrire, certaines écoles américaines renoncent à l'utilisation du stylo pour apprendre aux enfants à écrire directement sur le clavier. Et toujours aux États-Unis, 45 états ont décidé de rendre optionnel l'apprentissage de l'écriture cursive, en lettres attachées, dans les programmes scolaires. L'enseignement privilégié sera le script, une écriture dans laquelle les lettres ne sont pas liées les unes aux autres et dont le tracé correspond à celui des caractères d'imprimerie.

Mais ce choix a déclenché un vif débat. Certains estiment que les enfants qui ont une écriture peu soignée ne seront plus pénalisés et pourront ainsi être jugés sur leurs véritables qualités rédactionnelles par exemple. D'autres font état d'études qui établissent une forte corrélation entre la maîtrise précoce de l'écriture et la réussite scolaire.

En France, où l'enseignement de l'écriture cursive est roi, il n'est pas question pour l'instant de modifier les apprentissages. Mais la généralisation des ordinateurs pourrait en décider autrement. Doit-on s'inquiéter de cette disparition annoncée de l'écriture manuscrite au profit de l'écriture numérique ?

Pour Jean-Luc Velay, chercheur en neurosciences, la disparition de l'apprentissage manuscrit, qui risque de nuire notamment à l'apprentissage de la lecture, doit nous alarmer. Philippe Artières, historien, explique notre inquiétude par le rapport sacralisé que nous entretenons en France avec l'écriture. Selon lui, il serait préférable d'aborder cette question avec du recul et de replacer cette évolution dans une perspective historique. ■ **Marina Julienne**

Jean-Luc Velay est chargé de recherche au CNRS, au laboratoire de neurosciences cognitives du CNRS à l'université Aix-Marseille. Il travaille sur les troubles de l'écriture, en collaboration avec Marieke Longcamp, maître de conférences dans ce même laboratoire.



Philippe Artières est directeur de recherche au CNRS au sein de l'institut interdisciplinaire d'anthropologie du contemporain à l'École des hautes études en sciences sociales, spécialiste de l'écrit. Il a publié *La Police de l'écriture*, aux éditions La Découverte.

Les grandes dates

1856
premières plumes Sergent-Major, symbole de l'écriture liée, qui seront utilisées par des générations d'écoliers.

1945
les instructions pour l'école primaire prévoient l'apprentissage de l'écriture cursive.

1965
un décret de l'Éducation nationale autorise les élèves à écrire sur leur cahier avec un stylo à bille.

2013
certains États américains décident de ne plus recommander l'enseignement de l'écriture cursive.

© DR

© A. DI CROLLALANZA

Le grand débat

Faut-il craindre la fin de l'écriture manuscrite ?

« Le geste de l'écriture joue un grand rôle

Jean-Luc Velay

Changer aussi radicalement la pratique des enfants pourrait avoir des conséquences importantes, notamment sur l'apprentissage de la lecture.

Le débat n'est pas nouveau. En Amérique du Nord, on s'est depuis longtemps demandé s'il y avait un intérêt à apprendre deux écritures, cursive et script, et même si apprendre à écrire en cursive – ce qui est le cas en France – n'était pas pénalisant pour l'apprentissage de la lecture, car cette écriture est plus éloignée des caractères d'imprimerie. En fait, de nombreuses études montrent que les résultats des enfants en lecture et écriture ne sont pas différents, qu'ils apprennent la cursive ou le script.

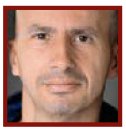
En revanche, le passage à l'apprentissage au clavier suscite de nombreuses questions. En effet, apprendre à écrire à la main consiste à acquérir une représentation visuelle et sensorimotrice spécifique à chaque lettre. Au clavier, on n'apprend pas à former les lettres, mais à localiser un lieu dans l'espace du clavier. Le mouvement appris dépend de la touche à atteindre mais pas de la forme de la lettre. La représentation sensorimotrice créée par le mouvement dactylographique est donc différente de celle créée par l'écriture manuscrite.

Or, le mouvement d'écriture joue un grand rôle dans la représentation et la mémorisation des caractères. Le geste consistant à reproduire une forme identique à celle de la lettre s'imprime dans les zones sensorimotrices du cerveau.

Avec Marieke Longcamp, maître de conférences au laboratoire, nous avons montré en 2003 dans une étude en imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf) que lorsque des adultes regardent des caractères alphabétiques ils réactivent des zones cérébrales impliquées dans l'écriture manuscrite de ces caractères. Autrement dit, quand ils regardent une lettre, en plus de la mémoire visuelle, ils utilisent la mémoire motrice.

Simulation pendant la lecture. Les mouvements de l'écriture sont « simulés » mentalement pendant la lecture. Cette mise en jeu d'une mémoire sensorimotrice viendrait assister la reconnaissance visuelle.

« Les nouvelles formes de l'écrit devraient



Philippe Artières

Il me semble que la crainte de la disparition de l'écriture manuscrite est un fantasme très puissant, car nos sociétés sont éminemment littéraires.

On oublie souvent qu'à la fin du XIXe siècle, à l'écriture ronde dite « française », on avait préféré l'écriture cursive « anglaise », qu'en somme tout au long de l'histoire contemporaine de l'écriture, celle-ci n'a cessé d'évoluer. L'histoire de la généralisation de l'écrit est d'ailleurs très courte, puisque les Français n'échangent massivement que depuis la fin du XIXe siècle, essentiellement d'ailleurs pour s'adapter aux impératifs économiques (remplir les registres de commerce notamment). Nier ces évolutions, les réduire à une disparition me semble relever d'un processus souvent à l'œuvre et qui empêche justement de penser.

Récemment, participant à une journée sur la typographie, j'ai assisté à des discussions très riches entre des paléographes et des typographes et créateurs de caractères graphiques. Ils partageaient en dépit du support (le papier ou l'écran) une culture graphique commune ; l'histoire des caractères était même le point d'appui de leurs pratiques et analyses respectives.

Avoir peur de la disparition du signe tracé par le vivant, c'est la peur de renoncer à une continuité, de perdre la mémoire

Dans *Her*, film américain de 2013 réalisé par Spike Jonze, le personnage principal, qui vit dans le futur, est un écrivain public ; il écrit pour des clients (enfant, mari, amant, grands-parents) ; mais sous sa dictée, c'est l'écriture manuscrite de son client qui apparaît et c'est elle qui sera transmise au destinataire. Nous ne sommes pas sortis de cette société graphique où l'écriture manuscrite

dans la mémorisation des caractères »

Pour le vérifier, nous avons, dans une autre étude, fait apprendre des caractères nouveaux à 76 enfants et à 24 adultes ; nous leur avons ensuite demandé de les reconnaître parmi d'autres caractères. Résultat : les caractères appris à la main sont mieux et plus durablement reconnus que ceux appris au clavier. En outre, quand les adultes effectuent cette tâche de reconnaissance visuelle en IRMf on observe une réactivation des aires sensorimotrices pour les caractères appris à la main, mais pas pour ceux appris au clavier.

Chez l'enfant comme chez l'adulte, les caractères appris à la main sont mieux reconnus que ceux appris au clavier

L'identification des lettres est une étape fondamentale de la lecture : si un lecteur est plus lent ou moins efficient dans ce processus élémentaire, il se peut que sa lecture soit moins fluide. Néanmoins, extrapoler à partir de résultats acquis en reconnaissance de lettres isolées, qui est loin de la vraie lecture, et affirmer qu'un enfant qui apprendrait à écrire uniquement au clavier aurait des difficultés de lecture serait très spéculatif. Pour le savoir, il faudrait disposer d'enfants qui n'apprennent pas à écrire à la main pendant plusieurs années puis mesurer leur compétence en lecture : ce sera semble-t-il possible dans quelques années aux États-Unis.

D'autres conséquences ont été envisagées, en particulier en ce qui concerne l'appauvrissement du contenu sémantique et syntaxique des textes produits au clavier. Enfin, il est possible que l'apprentissage intensif de l'écriture manuscrite, qui est très latéralisée, influence la latéralisation hémisphérique des enfants d'une façon qu'on ne retrouverait pas aussi fortement avec l'écriture dactylographique qui est bimanuelle.

Étudions donc précisément les changements cognitifs et cérébraux induits par la disparition de l'apprentissage de l'écriture manuscrite avant de modifier profondément et sans doute de façon irréversible des pratiques éducatives aussi fondamentales. ■

produire de nouveaux imaginaires »

est étroitement associée à l'individu et à sa personnalité. La croyance que « quelque chose de chacun » se loge dans son écriture est très forte.

Avant l'élection présidentielle de 1988, François Mitterrand n'a pas hésité à envoyer un document de campagne écrit à la main, un fac-similé ! La main demeure dans nos représentations, et malgré la possibilité d'un recours à une machine beaucoup plus efficace, celle dont doit sortir l'écriture. Il n'en a pas toujours été ainsi ; on a longtemps écrit en déléguant l'acte. L'écrivain public au XVIII[e] siècle ou la dactylographe ont été quelques-uns de ces scripteurs par délégation. Mais toujours la signature est demeurée.

Caractères et personnalité. Historiquement, un lien étroit a été établi entre l'écriture et le corps ; le développement de la graphologie n'est qu'une des manifestations de ce regard porté sur ces signes noirs dessinés sur la page blanche. Tout se passe comme si en écrivant, un peu de notre corps et de notre pensée, de notre caractère, s'inscrit en son dehors. Cette croyance a généré bien des pratiques, non seulement l'expertise psychiatrique et médicale des écrits, mais aussi la très forte valorisation des manuscrits. L'autographe à partir de la fin du XVIII[e] siècle devient objet de collection et désormais de nombreuses bibliothèques dans le monde s'arrachent ces lambeaux graphiques.

Devant cet attachement à l'écrit manuscrit – qui se manifeste aussi bien dans l'achat par une institution d'un brouillon manuel que par la violence des réactions lorsqu'on émet la possibilité de ne plus donner à l'enseignement de l'écriture une place centrale – d'aucun parlerait de fétichisme. Il me semble plutôt qu'il y a dans cette angoisse de la disparition du signe tracé par le vivant, dans l'effacement de cette trace corporelle, l'omniprésence de la mémoire. Abandonner l'écriture manuscrite serait d'une certaine manière rompre un lien, renoncer à une continuité, bref couper le trait, la ligne.

Or on peut penser sans écrire, et je parierai plutôt sur le fait que l'hybridation de l'écrit à laquelle on assiste aujourd'hui devrait produire de nouveaux imaginaires plutôt que de les anéantir. ■

FUTUR EN SEINE

LE FESTIVAL DU NUMÉRIQUE

DU 12 AU 22 JUIN 2014

cap·digital Paris Region

* Fait ensemble

DU 12 AU 15 JUIN

Cnam, Gaîté lyrique, Musée des arts et métiers

Expositions, conférences, rencontres, actions, business
Pour petits et grands

#FENS2014
292, rue Saint-Martin • 3 bis, rue Papin • Paris 3e

ET JUSQU'AU 22 JUIN

Toute l'Île-de-France

Une centaine d'évènements partenaires

Programme complet :
www.futur-en-seine.fr

îledeFrance
Demain s'invente ici

MAIRIE DE PARIS · Seine-Saint-Denis Le Département · orange · La Poste · JCDecaux · GDF SUEZ

le cnam · gaîté lyrique · Europe 1.fr · Le Nouvel Observateur · A NOUS PARIS · 12345 francetélévisions

ces modernes

dissociable de la fabrication d'un public.
e Simon Schaffer peut être ainsi lue comme
rse de la confiance et du crédit à l'époque
. Fabriquer et entretenir la confiance n'était
dans l'ordre informationnel de l'époque
marqué par des désastres retentissants. En
l'incroyable histoire d'un certain George
ızar qui un beau jour de 1704 se présente
ɔnne société londonienne comme un habi-
ɾrmose (Taïwan), enlevé par les Jésuites et
force en Europe. Il est introduit à la Royal
eçu par Newton ; il publie une extraordi-
toire de Formose présentant les habitants
es polygames se délectant de la chair de
uses, et reçoit, une chaire de « formosan » à
té d'Oxford. Psalmanazar, natif d'Avignon,
ıparavant jamais quitté la Provence.
enfin accorde une attention aiguë aux
lieux où se fait la science.
Il s'agit là d'une méthode classique
depuis les années 1980, mais elle prend
ici une dimension nouvelle grâce à
l'étude approfondie du rôle du global
dans la fabrique des sciences modernes.
Le formidable chapitre « Newton à la
plage » propose ainsi une relecture du
héros de la révolution scientifique.
Newton n'est pas cet esprit solitaire
popularisé dans l'imaginaire occidental
par les gravures de William Blake, mais
un administrateur (à la Royal Society et à
la Monnaie) très connecté aux avant-
postes de l'empire commercial britanni-
que. Une carte fascinante de tous les lieux
apparaissant dans le *Système du monde* montre par
exemple l'importance du commerce triangulaire des
esclaves pour la théorie de la gravitation, pour l'étude
des pendules battant la seconde, ou celle des marées
aux quatre coins du globe.

Seuil, coll. « Science ouverte » 2014, 448 p., 24 €.

Lumières bigarrées de Simon Schaffer. Premièrement, l'importance du monde productif, des artisans, de la manufacture et du capitalisme dans l'histoire des sciences modernes. L'artisan, ses savoirs tacites et ses tours de main jouent un rôle déterminant dans la constitution des pratiques expérimentales (la teinturerie est ainsi indispensable à la production et à l'étude des phénomènes électriques au XVIII[e] siècle). Ou encore, le modèle manufacturier structure l'organisation du travail à l'observatoire de Greenwich au XIX[e] siècle.

Deuxièmement : l'importance du spectacle et de la représentation. Simon Schaffer tord le cou à un cliché entourant les liens entre science et public, qui penserait la science comme d'abord recluse et déconnectée, puis rendue publique à travers la divulgation. Or l'histoire montre clairement que la constitution du

Au final, ce qui frappe dans l'œuvre de Simon Schaffer, l'exubérance de son style et la finesse de ses descriptions empiriques, c'est sa nature profondément historienne. *La Fabrique des sciences modernes* est un livre indispensable car il nous donne enfin à lire une histoire non-moderniste de la science moderne. ■

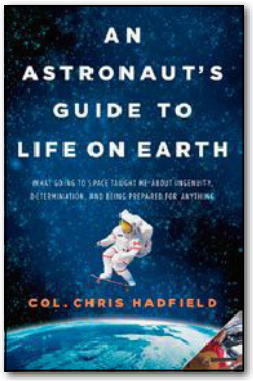
PAR **Jean-Baptiste Fressoz,** historien des sciences.

Guide to th

tre choix que d'anticiper à cha-
nde ce qui pourrait l'anéantir.
logie de la nullité est tout aussi
use. Il distingue trois catégo-
dividus : les – 1, les 0 et les + 1.
it ouvertement et génère des
es ; le + 1, on s'en doute, est
rt bénéfique à son environ-
. Le 0, lui, a un impact neutre.
e nuit pas, ce qui est immense
contexte où la moindre
ut être fatale. Le 0 observe,
.... à devenir un + 1. Hadfield ne
se gêne d'ailleurs pas pour
décrier ceux qui sont per-
suadés d'être des + 1 mais
qui, de fait, se condamnent à
être perçus comme des – 1.

Au-delà des leçons de vie, l'astronaute partage son quotidien : sa difficile conciliation travail-famille, mais aussi les aléas de la vie à bord de l'ISS, comme il le faisait dans ces vidéos visionnées des millions de fois sur YouTube : brossage de dents, lavage de cheveux, coupe d'ongles... Il insiste également sur l'importance des expériences menées à bord, quelque peu noyées dans la frénésie médiatique qui a fait de lui une superstar. Une superstar qui n'attrape jamais la grosse tête : *« Aucun astronaute, aussi brillant ou courageux soit-il, n'est un soliste »*, écrit-il en faisant aussi bien référence aux experts qui ont supervisé ses entraînements qu'aux soudeurs qui ont assemblé le Soyouz ou aux travailleurs du textile qui ont fabriqué ses combinaisons. L'humilité d'un être d'exception : voilà qui pourrait résumer cet ouvrage, sans l'ombre d'un doute un + 1.

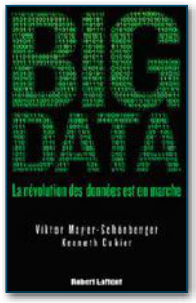
Par Marie-Pier Elie, journaliste à Montréal.



Random House Canada, 2013, 336 p., 32 $.

développement personnel sur les rayons des librairies. Car dans son périple parfois cahoteux vers l'espace, Chris Hadfield a d'abord et avant tout *« appris comment vivre mieux et plus heureux ici sur Terre »*. Les secrets de son mieux-vivre sont également des titres de chapitres : se tracasser avec les petits détails futiles (*« Sweat the small stuff »*), aspirer à être un nul (*« Aim to be a zero »*), sans oublier le pouvoir de la pensée négative (*« The Power of Negative Thinking »*).

Il est plutôt jouissif, alors que tant de gourous vantent les vertus de la pensée positive un peu « gnangnan », qu'un sympathique gourou moustachu fasse la promotion de la pensée négative et incite à envisager continuellement le pire. Car un astronaute



Big Data

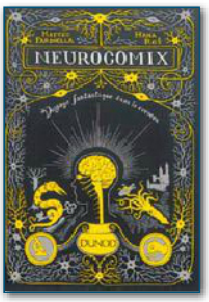
Viktor Mayer-Schönberger et Kenneth Cukier

Robert Laffont, 2014, 296 p., 21 €.

et
a
que
-
ero
er.

ita
ce
n-
ole.

représentations symboliques (monstres, animaux) sont toutefois un peu exagérées, voire gratuites.



Neurocomix

Matteo Farinella et Hana Ros

Dunod, 60 p., 14,90 €.

Si vous vous demandez comment le cerveau fonctionne dans ses grandes lignes, cette bande dessinée pourra satisfaire votre curiosité. En cinq chapitres, pour cinq aspects physiologiques ou comportementaux, elle raconte l'épopée d'un galant, prisonnier du cerveau de sa belle. La narration, qui se tisse au fil des rencontres avec les grands noms de la neurobiologie, sert avant tout de prétexte à de brefs textes explicatifs agrémentés de schémas clairs. On pénètre ainsi avec aisance dans les arcanes du cerveau. Certaines

Notre-Dame-des-Landes

Hervé Kempf

Seuil, 2014, 160 p., 10 €.

Le projet d'aéroport de Notre-Dame-des-Landes remonte aux années 1970. Dans cet ouvrage, l'auteur, journaliste passé par *La Recherche* et défenseur de l'écologie, retrace son histoire du point de vue des opposants. Le récit se nourrit des reportages et rencontres qu'il a faits sur place, au fil des ans, ce qui en fait un texte certes partisan, mais bien documenté et vivant.

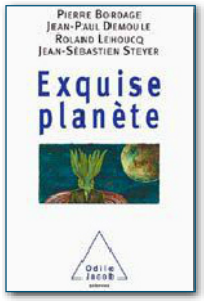
TOUCHE PAS À MA SCIENCE

Un charlatan sur les dents

Jérôme Golmard, ancien numéro un du tennis français, est atteint, à ses 40 ans, de la maladie de Charcot. Celle-ci attaque les connexions entre le cerveau et les muscles, et la médecine officielle est pour l'instant impuissante. Son espérance de vie semble être malheureusement réduite à quelques années seulement. Mais, battant dans l'âme, Jérôme Golmard veut y croire et rencontre un dentiste qui, lui, a une solution miracle pour… quelques centaines de milliers de dollars. Comme tout bon charlatan, il utilise des termes scientifiques en apparence techniques mais qui une fois mis bout à bout n'ont plus guère de sens. Il imagine par exemple des liens entre les dents et les organes par des *« méridiens énergétiques »* ; il estime, à l'encontre de toutes les connaissances du domaine, que des bactéries sont une cause probable à l'origine de la maladie de Charcot ; et il soigne toutes sortes de maladies en désinfectant des cavités présentes dans les os de la mâchoire. Il faut dire qu'il est spécialiste de la « névralgie induite par ostéonécrose des cavitations » dont personne n'a pu encore mettre en évidence une quelconque efficacité. La somme demandée étant conséquente, Jérôme Golmard décide de faire appel à la générosité du grand public. Une histoire émouvante que ne pouvaient rater certains médias, tels lequipe.fr ou 20minutes.fr qui en ont fait une publicité inespérée. La situation en devient pourtant grotesque : un appel aux dons publics est lancé pour soigner une maladie grave avec une thérapie sans aucune efficacité, pour une somme totalement ahurissante ! S'il est bon de toujours préserver l'espoir chez les malades, il est aussi de notre devoir de dénoncer les arnaques, médiatisées qui plus est !

Nima Yeganefar, université de Poitiers, auteur du blog Sham and Science

http://bit.ly/ShamGolmardCharcot ; http://bit.ly/LequipeGolmard ; http://bit.ly/20minutesGolmard



Exquise planète

Pierre Bordage, Jean-Paul Demoule, Roland Lehoucq et Jean-Sébastien Steyer

Odile Jacob, 2014, 178 p., 19,90 €.

Un astrophysicien imagine une planète. Un paléontologue imagine les formes de vie qui pourraient s'y développer. Un archéologue imagine leurs développements culturels. Et un auteur de science-fiction nous en raconte la colonisation par les hommes. Une forme originale et attractive pour montrer la singularité de l'histoire terrestre et l'étendue du champ des possibles. >>>

tement animal doit combattre les préjugés obsolètes. Invoquant tour à tour découvertes scientifiques et anecdotes, raison et affect, il parvient à transmettre de soli-

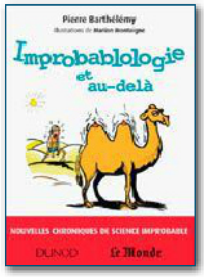
des connaissances sur le chat, le chien et leur histoire commune avec l'homme, tout en gardant un style simple. L'occasion de questionner la place faite par notre société à ces compagnons millénaires.

des champs ?

Collectif

Actes Sud, 2014, 120 p., 24 €.

Mêlant histoire, géographie, archéologie, géologie, architecture et plus encore, les auteurs de cet ouvrage proposent une synthèse de ce que l'on sait aujourd'hui, tant sur les villes que sur les campagnes, de la période romaine en Alsace. La part belle est aussi faite aux illustrations, cartes, schémas et photographies.

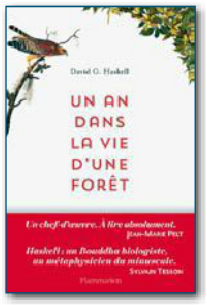


Improbablologie et au-delà

Pierre Barthélémy

Dunod, 176 p., 12,90 €.

Après le succès des *Chroniques de science improbable*, le journaliste Pierre Barthélémy nous invite à un nouveau voyage en improbablologie. Vous découvrirez à quelle heure nous sommes le plus honnête, le fonctionnement de l'estomac d'un ogre ou encore pourquoi le magazine *Playboy* a servi d'outil scientifique. Dans ce livre très bien illustré, l'auteur transmet avec humour ses réflexions sur les avancées de la science.

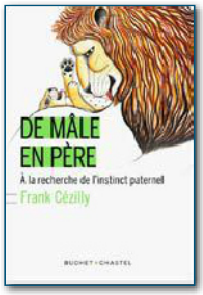


Un an dans la vie d'une forêt

David G. Haskell

Flammarion, 356 p., 21,90 €.

C'est à un fabuleux voyage au cœur de la forêt que nous invite le biologiste américain David Haskell. Durant un an, il en a étudié l'évolution jour après jour, se concentrant sur un unique mètre carré de forêt. Inspiré par l'esthétique autant que par la science, il décrit à travers quarante-cinq petits essais la vie de tous les êtres vivants peuplant la forêt et qui y suivent le rythme des saisons.



De mâle en père

Frank Cézilly

Buchet Chastel, 272 p., 19 €.

Qu'est-ce que l'instinct paternel ? Sous quelles formes existe-t-il dans le règne animal ? Peut-on en tirer des enseignements pour l'homme ? Voilà les questions traitées de façon abordable dans cet ouvrage par un spécialiste de l'écologie comportementale, professeur à l'université de Bourgogne. L'occasion de tordre le cou à quelques stéréotypes : non, le père répressif n'est pas l'archétype du géniteur dans la nature, pas plus que la mère n'est forcément toute dévouée à sa progéniture. L'évolution a fait preuve d'une grande originalité, propre à bouleverser nos idées sur le rôle du père, y compris dans les sociétés humaines.

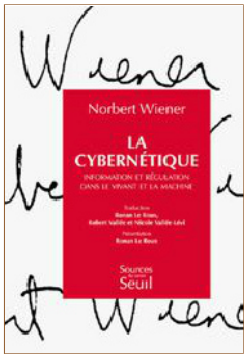
Et aussi :

La Grande Invasion. Qui a peur des espèces invasives ?
Jacques Tassin, Odile Jacob, 2014, 210 p., 22,90 €.

La Plante et ses sens
Daniel Chamovitz, Buchet Chastel, 2014, 192 p., 17 €.

ANNIVERSAIRE

La Cybernétique



Quel est le point commun entre un robot, Internet, et le concept de régulation génique ? La cybernétique ! Définie comme la science des interactions entre les composants d'un système autorégulé, elle est née dans l'esprit d'un mathématicien américain, Norbert Wiener, qui en publie le livre fondateur en 1948. Malgré un retentissement immédiat et des champs d'applications foisonnants grâce au concept de rétroaction, *Cybernetics* n'avait jusqu'à aujourd'hui jamais été traduit en français. C'est chose faite. À l'occasion du cinquantenaire de la mort de Wiener, les éditions du Seuil proposent également une réédition de *Cybernétique & Société*, du même auteur, ainsi qu'une analyse de l'essor de cette discipline, intitulée *Les Rêves cybernétiques de Norbert Wiener*, par le philosophe et mathématicien Pierre Cassou-Noguès.

Norbert Wiener, Seuil, 2014, 369 p., 28 €.

LE MAGAZINE
6,40€ le numéro

NOUVEAU !

La Recherche lance

www.sophiaboutique.fr

Retrouvez l'intégralité des produits disponibles de **La Recherche** : magazines papier et numérique, livres et Ebooks, voyages, conférences... mais aussi des idées cadeaux, des **promotions** jusqu'à **50% de remise**, des **déstockages à partir de 1,90 €** et plein d'autres avantages.

ACTUELLEMENT
Livraison offerte à partir de 49 € d'achat

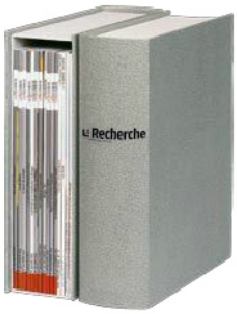
Connectez-vous vite sur www.sophiaboutique.fr

LES DOSSIERS DE LA RECHERCHE

Année 2012
RD47 : Les énergies de demain
RD48 : Dieu et la science
RD49 : La mémoire
RD50 : Les plus belles énigmes de la science
RD51 : Les pôles, enjeu planétaire
SP01 : La naissance

Année 2013
SP02 : Les origines de la vie
SP03 : Les abysses
SP04 : Les particules élémentaires
SP05 : Jeux de mathématiques et de physique
SP06 : Addictions
SP07 : L'album de l'année 2013

Année 2014
SP08 : L'intelligence artificielle
SP09 : Les nouvelles dimensions du son



Et pour conserver votre collection précieusement

➲ **l'écrin 12 numéros 18€ seulement**
(hors frais de port)

Bon de commande

A retourner sous enveloppe affranchie à LA RECHERCHE
BP 65 - 24 chemin Latéral - 45390 Puiseaux - ✆ 33 (0) 2 38 33 42 89 - nchevallier.s@orange.fr

V 488

J'indique mes coordonnées :

Nom : Prénom :

Adresse :

Code postal : Ville : Pays :

E-mail :

Si vous souhaitez recevoir des offres de notre part, merci de nous indiquer votre e-mail.

Oui, je souhaite recevoir dans les 10 jours la commande ci-dessous

Indiquez ci-dessous les numéros souhaités	Quantité	Prix unitaire TTC	TOTAL TTC
■ LA RECHERCHE - préciser le/les numéro(s) 6,40€		6,40 €	€
■ LES DOSSIERS DE LA RECHERCHE - préciser la/les référence(s) commençant par RD et SP 6,90€		6,90€	
■ L'écrin LA RECHERCHE 12 numéros 18€		18,00 €	€
FRAIS DE PORT : 1 numéro : 1,50€ / numéro supplémentaire : + 0,50€			€
1 écrin : 5,08€ / 2 ou 3 écrins : 6,02€			€
Total de ma commande (Frais de port inclus)			€

Je règle aujourd'hui par :

❒ chèque à l'ordre de *Sophia Publications* ❒ carte bancaire

N° | | | | | | | | | | | | | | | | |

Je note aussi les 3 derniers chiffres du numéro inscrit au dos de ma carte bancaire, au niveau de la signature : Expire fin :

Signature obligatoire :

Votre commande sera expédiée à réception de votre règlement.

Loi informatique et libertés : vous disposez d'un droit d'accès et de rectification des données vous concernant. Elles pourront être cédées à des organismes extérieurs sauf si vous cochez la case ci-contre ☐

Histoire de science

Alors que commence la Première Guerre mondiale, les médecins n'ont pas de méthode efficace pour désinfecter les plaies. Pire, certains pensent qu'il n'en existe pas. Un chirurgien et biologiste français, Prix Nobel, et un biochimiste anglais vont leur donner tort et sauver des milliers de vies.

1914 : Carrel et Dakin se battent pour l'antisepsie

Éric Sartori
travaille dans la recherche pharmaceutique. Il est l'auteur de plusieurs ouvrages d'histoire des sciences.

Le 10 avril 1914, le médecin inspecteur général Edmond Delorme préconise devant l'Académie de médecine l'« abstention chirurgicale ». En temps de guerre, les chirurgiens ne doivent opérer qu'exceptionnellement à l'avant, et priorité doit être donnée à une évacuation rapide vers l'arrière. Ces recommandations se fondent sur les plaies des guerres précédentes, des plaies par balles avec des trajets rectilignes, peu souillés.

Mais si jamais une guerre ne fut propre, celle qui commence quelques mois plus tard se montre particulièrement sale. Éclats d'obus, de grenade, balles de mitrailleuses créent des plaies larges, déchiquetées, souillées de débris divers. Les terribles gangrènes compliquées d'infection à germes anaérobies provoquant la production de gaz au sein des tissus infectés, presque oubliées, réapparaissent en masse. Aussi, le 28 septembre, Delorme revient-il sur ses déclarations : « *La règle de l'abstention ne saurait s'appliquer aux balles des Shrapnells et aux éclats d'obus.* » Il faut agir rapidement, désinfecter.

© REVUE D'HISTOIRE DE LA PHARMACIE, 1981, VOL.69, P. 79. COLL. PARTICULIÈRE/DR

Henry Dakin, en 1915, met au point un désinfectant à base de carbonate de soude et de chlorure de calcium.

On ne peut résumer ici l'histoire de l'antisepsie. En 1847, à Vienne, Ignace Semmelweis, médecin obstétricien, en lutte contre la forte mortalité périnatale (30 % dans sa clinique) veut imposer à ses collègues le lavage des mains. Ridiculisé, persécuté, il en perdra la raison. La découverte des microbes par Louis Pasteur change tout. Le chirurgien écossais Joseph Lister comprend que le pus, contrairement à l'opinion médicale dominante, n'aide pas à la cicatrisation, mais résulte d'une infection qui doit être combattue. S'inspirant d'un article allemand décrivant le traitement de champs d'épandage par du phénol pour diminuer les odeurs, il traite deux patients souffrant de fractures graves avec des compresses imprégnées de phénol et obtient une guérison plus rapide. C'est, en 1865, au King's College de Londres, le début de l'antisepsie.

Amputations à la chaîne. En 1914, le chirurgien Alexis Carrel (Prix Nobel de médecine 1912), qui travaille à la Fondation Rockefeller, à New York, revient en France. De la suture vasculaire, qu'il avait inventée à Lyon en 1902, il est passé aux premières greffes chez l'animal (rein, cœur, poumon, membres), puis, pour étudier les phénomènes de rejets, a inventé les cultures cellulaires. Mobilisé volontaire à 41 ans, il entreprend une tournée des hôpitaux militaires. Ce qu'il y voit l'horrifie : pas d'autoclaves pour stériliser, odeurs repoussantes,

Alexis Carrel, ici en 1919 dans son laboratoire militaire, fit de la lutte contre les infections son cheval de bataille. Dès 1915, il définit avec Henry Dakin le protocole de traitement : la plaie est nettoyée, irriguée par une solution de Dakin puis refermée dès qu'elle est débarrassée des microbes.

© UNDERWOOD & UNDERWOOD/CORBIS

épidémies de gangrènes gazeuses et amputations à la chaîne. En matière de désinfection, tout, et n'importe quoi : sel de cuisine, baumes divers, alcool, éther, teinture d'iode. Revenus au Moyen Âge, des médecins-majors plongeaient des fers rouges au fond des plaies.

Carrel obtient du ministère de la Guerre la création d'un hôpital, près de Compiègne, pour lequel il exige un laboratoire de chimie et de bactériologie. Les autorités militaires le lui refusent. Il fait alors intervenir la Fondation Rockefeller, à qui il demande aussi l'aide d'un biochimiste. C'est ainsi que l'anglais Henry Dakin arrive en décembre 1914 en France, avec pour mission de découvrir un antiseptique.

Sel de cuisine, alcool, baumes : tout et n'importe quoi sert à désinfecter les plaies

Carrel et Dakin s'accordent sur le fait que les blessures doivent être traitées par un agent chimique ; vaccins et sérums ne peuvent combattre une infection massive par des bactéries très variées. Il fallait un bactéricide puissant, non toxique, peu irritant, diffusant bien dans les plaies et de préparation facile. Outre la préparation de composés, le travail de Dakin comporte un volet quantitatif permettant de préciser la concentration nécessaire de l'antiseptique, sa durée d'action, son influence sur le nombre et la nature des bactéries et la vitesse de cicatrisation. Carrel insiste sur la nécessité d'expériences claires et concluantes : en matière d'antiseptique, « *nous devons attribuer la stagnation actuelle au manque de précision des études cliniques.* »

En mars 1915, après 200 substances testées, Dakin retient le dérivé n° 30, solution d'hypochlorite préparée à partir de carbonate de soude et de chlorure de calcium. Entre mars et août, Dakin et Carrel mettent au point une méthode industrielle de fabrication avec les établissements Poulenc. Et ils définissent leur protocole de traitement : la plaie est nettoyée, puis irriguée par une solution de Dakin répartie par des peignes de verre prolongés par des petits tubes en caoutchouc perforés ; puis elle est refermée dès que la numération des microbes est négative.

Les premiers résultats, présentés devant l'Académie des sciences le 2 août 1915, ne suscitent pas l'enthousiasme. Sir Almroth Wright, inventeur de la vaccination antityphoïdique, médecin colonel dans l'armée britannique, avait déclaré en avril : « *Le traitement des blessures infectées par les moyens antiseptiques est illusoire et la croyance en leur efficacité est fondée sur un raisonnement faux.* » Un défenseur de poids, Samuel Pozzi, ›››

1914 : Carrel et Dakin se battent pour l'antisepsie

>>> propagateur des idées de Lister en France, soutient Carrel et Dakin, mais s'attire l'ironie d'Auguste Broca, l'un des pontes de l'Académie de médecine : *« Nous rapporter cela d'Amérique, laissez-moi rire ! »*

Réticence du corps médical. Ce scepticisme pouvait se comprendre. Les solutions de phénol de Lister, d'utilisation délicate, étaient employées à des concentrations trop faibles, ce qui les rendait inefficaces. L'alcool et l'éther, peu efficaces, brûlaient les chairs et leur inflammabilité les rendait dangereux. La teinture d'iode, plus active, entraînait de nombreuses et graves intolérances. Le formol, efficace, devait être accompagné de morphine, tant il provoquait de douleurs intenses. L'eau oxygénée pénétrait mal dans les tissus, et ne tuait que les bactéries anaérobies, ce qui ne suffisait pas à écarter tout danger. Bref, rien ne fonctionnait de manière convaincante.

L'un des adversaires les plus acharnés de Carrel et Dakin fut Pierre Delbet, de l'Académie de médecine. Revenant à une époque prélistérienne, il considérait que *« le pus a parfois des activités bactéricides très marquées »* et que *« les antiseptiques troublaient l'un des modes de défense de l'organisme »*. Il constate que le pus traité par les antiseptiques donne des cultures plus rapides et abondantes et avance trois explications possibles : l'altération des leucocytes, des modifications des humeurs troublant leur caractère bactéricide ou l'accoutumance des microbes aux antiseptiques. Il n'en démontre aucune, mais termine en affirmant que *« souvent le nombre des microbes augmente dans les plaies pansées avec des antiseptiques. Que ce soit paradoxal pour les chirurgiens, on l'entend ; mais il en est autrement dans d'autres milieux adonnés aux études des sciences biologiques »* ; autrement dit, que Carrel et Dakin apprennent la biologie !

Carrel enrage contre la morgue de *« ces hommes qui n'ont pris la peine ni d'examiner nos techniques ni de contrôler nos résultats »*, et souligne que les cultures de pus sont trop éloignées de la clinique pour donner des résultats exploitables. Il est d'autant plus furieux que, sous l'influence de ces critiques et de la jalousie de certains confrères, on ne lui envoie pratiquement aucun blessé. Le 15 avril 1916, il se plaint ainsi dans une lettre à un ami, l'aide-major Dumas : *« Les grands chefs du Service de santé continuent à contempler avec sérénité les abominables résultats obtenus presque partout en France. J'ai vu avant-hier à Paris 150 blessés arrivant de Verdun qui étaient tous profondément infectés et dont les plaies ruisselaient de pus. Les pontifes des Académies et des universités laisseront tous ces malheureux pourrir d'infection plutôt que d'admettre que le moyen de guérir ces blessés existe puisque ce moyen n'a pas été trouvé par eux. »*

Cependant, certains chirurgiens décident d'essayer le protocole Carrel-Dakin. Chef du Service de santé d'un corps d'armée, Uffolz rapporte dès la fin 1915 des résultats extrêmement positifs : *« Pour 1 095 blessés, le nombre des amputations pratiquées a été au total de 6. La moyenne des amputations dues à des accidents infectieux se réduit donc actuellement à une pour 200 blessés. »* Le médecin-major Perret rapporte à l'Académie de médecine en avril 1916 que sur 111 blessés graves, il n'a eu aucun décès : *« On peut conclure ardemment que, aujourd'hui, nous sommes maîtres de l'infection des plaies. Il n'est plus permis d'hésiter. »* En décembre 1916, la méthode Carrel-Dakin est plébiscitée par la Commission permanente de la gangrène et se répand progressivement.

Un million de vies épargnées. Le sceptique Wright, qui avait toutefois, dès juin 1915, pris la peine de venir à Compiègne examiner les expériences de Dakin et avait emporté la recette du précieux liquide pour l'étudier, annonce sa conversion le 15 mars 1917, lors de la première conférence chirurgicale interalliée : il qualifie la méthode Carrel-Dakin de *« plus grande contribution à la technique chirurgicale depuis le début de la guerre »*. Il a été estimé que les méthodes de Carrel et Dakin ont sauvé la vie de plus de 1 million de combattants et préservé un nombre plus grand encore de mutilations.

Malgré ce succès, Delbet, toujours persuadé des vertus du pus, mit au point en 1918 le Propidon, composé de staphylocoques, streptocoques et bacilles du pus, utilisé jusque dans les années 1940 pour de douteuses et douloureuses pyrétothérapies (traitement par la fièvre). Le Dakin-Cooper stabilisé (du nom de la Coopération Pharmaceutique, son principal fabricant) est, lui, toujours l'un des antiseptiques les plus utilisés. Dans sa formule actuelle, il comprend de l'eau de Javel, du permanganate de potassium et du phosphate de sodium. Ses deux inventeurs ne se sont pas contentés d'expériences de laboratoire, mais ils ont amené leur laboratoire au lit des malades, et avec énergie et persévérance, ils ont refusé la fatalité de la maladie, de la douleur, de l'amputation, et ont voulu ici et maintenant soulager les blessés. ■

Pour en savoir plus

> F. Chauvin *et al.*, *L'évolution de la chirurgie des plaies de guerre des membres en 1914-1918, Histoire des sciences médicales, 36,* 157, 2002.

> L. Baguenier-Desormeaux, *Henry Drysdale Dakin à Compiègne en 1915, Revue d'histoire de la pharmacie,* 69e année, 79, 1981.

> A. Carrel, *Le Traitement des plaies infectées,* Masson, 1917.

ABONNEZ-VOUS À La Recherche
L'actualité des sciences

Et recevez en cadeau l'album "La Physique en 18 mots-clés"

1 AN - 12 nos

62€

au lieu de ~~76€80~~

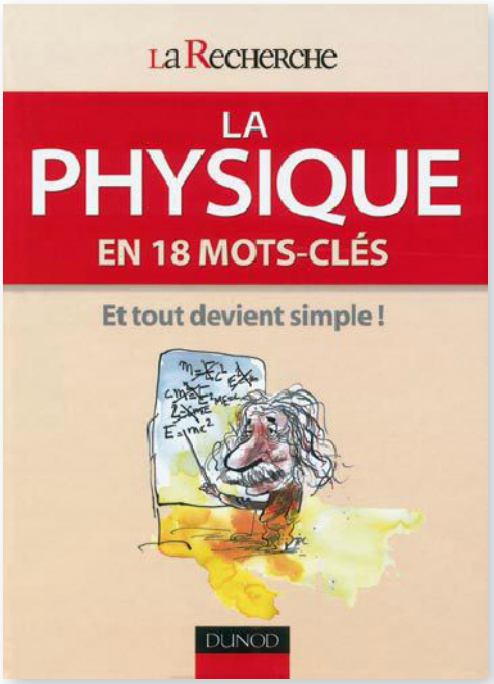
Soit **20%** **de réduction**

Testez vos connaissances avec le quiz de 18 questions et leurs solutions.

Que signifie $E=mc^2$? Que se passe-t-il lorsqu'on franchit le mur du son ? Qu'est-ce que le zéro absolu ?... Cet album illustré, tout en couleur, explique très simplement **18 notions clés de la physique qui permettent de répondre à ces questions et à bien d'autres que nous nous posons sur notre environnement.**

Huit petites expériences à faire soi-même, avec leur solution, et un quiz complètent l'ouvrage.

Co-édition Dunod-La Recherche - 128 pages.



BULLETIN D'ABONNEMENT

À retourner sous enveloppe affranchie à La Recherche - Service Abonnements - 17, route des Boulangers - 78926 Yvelines cedex 9

OUI, je souhaite m'abonner à **La Recherche** et recevoir **EN CADEAU** l'album "La Physique en 18 mots-clés" (C99).

☐ **1 AN - 12 NUMÉROS** au prix de **62€** au lieu de ~~76€80~~* soit près de **15€** d'économie.

Je préfère l'abonnement couplé avec les Dossiers :

☐ **1 AN - 12 NUMÉROS** + **6 numéros des Dossiers de La Recherche** au prix de **89€** au lieu de ~~118€20~~* soit près de **30€** d'économie.

Je profite de **l'option 4 fois sans frais** et je règle dès maintenant par chèque ou CB mon premier paiement soit :

☐ **15€50** pour **1 AN - 12 Nos**.

☐ **22€25** pour **1 AN - 12 Nos + 6 Nos** des **Dossiers de La Recherche.**

Puis je recevrai par courrier l'autorisation de prélèvement qui me permettra de régler les trois autres versements par prélèvement automatique trimestriel.

J'indique ci-dessous mes coordonnées :

Nom : _____

Prénom : _____

Adresse : _____

Code Postal : |_|_|_|_|_|

Ville : _____

Téléphone : |_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|

Si vous souhaitez recevoir des offres de notre part, merci de nous indiquer votre e-mail :

_____ @ _____

Je règle à l'ordre de La Recherche par :

☐ Par chèque ☐ Par carte bancaire

Numéro CB : |_|_|_|_| |_|_|_|_| |_|_|_|_| |_|_|_|_|

Notez aussi les 3 derniers chiffres du numéro inscrit au dos de votre carte bancaire, au niveau de la signature : |_|_|_|

Expire fin : |_|_| |_|_|

Signature obligatoire

Sophia Publications - SA au capital de 7 615 531 € - 562 029 223 RCS Paris
Service abonnements : ✆ France : 01 55 56 71 15 - ✆ Etranger : 00 33 155 56 71 15
E-mail : abo.recherche@groupe-gli.com

*Vous pouvez acquérir chacun des numéros au prix de 6€40 et les Dossiers de La Recherche au prix de 6€90. Offre réservée aux nouveaux abonnés valable jusqu'au 31/08/2014 dans la limite des stocks disponibles. Loi informatique et libertés : vous disposez d'un droit d'accès et de rectification des informations vous concernant. Elles pourront être cédées à des organismes extérieurs sauf si vous cochez cette case ❑.

PLRC488

Agenda

Le 3 juin, 18 h 30

L'autisme : une altérité ?

Conférence et spectacle. En France, le débat autour de la psychiatrie de l'autisme reste vif et pas toujours centré sur des arguments scientifiques. La psychiatre Monica Zilbovicius, qui travaille sur les mécanismes cérébraux de cette maladie, montre en quoi les dernières avancées permettent de mieux soigner les patients. Le spectacle *Autour d'Annette* illustre son propos de façon poétique.

Lyon (Rhône), ENS, Site Jacques Monod. http://tinyurl.com/conf-autisme-lyon

Le 5 juin, 18 h

Minéraux et cristaux cachés du quotidien

Conférence. Les cristaux synthétiques et naturels se cachent dans nombre d'objets de consommation quotidiens. Beaucoup de matières plastiques, par exemple, doivent leur couleur, leur rigidité ou leur étanchéité à de petites particules minérales. Olivier Grauby, chercheur en nanosciences, passe ces matériaux à la loupe.

Marseille (Bouches-du-Rhône), CNRS. http://tinyurl.com/provence-corse-jeudis-cnrs

Le 7 juin, 14 h 30

Le temps, sa fuite, sa flèche et ses gardiens

Conférence. Le temps est un concept très difficile à définir : il s'écoule inexorablement, toujours dans le même sens. François Vernotte, physicien à l'observatoire de Besançon, explique cette dimension particulière de l'espace-temps d'Einstein qui reste pourtant la grandeur physique que l'on sait mesurer avec la meilleure précision.

Besançon (Doubs), observatoire. http://tinyurl.com/prog-conf-obs-besancon

Le 7 juin, 19h

Gaia, l'arpenteur de la Voie lactée

Conférence. Lancé avec succès en décembre 2013, le satellite Gaia a rejoint sont poste d'observation en février. L'astronome François Mignard a participé à l'élaboration de cette mission d'étude de la Voie lactée. Il en rappelle les objectifs, et présente les instruments embarqués à bord de ce satellite pour mesurer les distances des étoiles.

Èze-le-Col (Alpes-Maritimes), Astrorama. http://tinyurl.com/astrorama-conf-gaia

Le 10 juin, 20 h 30

Le lent ballet de la tectonique des plaques

Conférence. Les tremblements de terre témoignent des déplacements et des déformations de l'écorce terrestre. À l'échelle des temps géologiques, ces déplacements ouvrent et ferment des océans et édifient les chaînes de montagnes. Le géologue Jean-Pierre Brun montre les mécanismes physiques qui régissent ces phénomènes.

Rennes (Ille-et-Vilaine), espace des sciences. http://tinyurl.com/ballet-tectonique-rennes

Du 10 au 15 juin

Festival du film de chercheur

Festival. Sommes-nous entrés dans l'Anthropocène, nouvel âge marqué par l'impact des humains sur la Terre? À travers cette question, le festival propose de remonter le temps jusqu'à la constitution des supercontinents. Mais toutes les disciplines sont représentées dans la soixantaine de films à l'affiche, dont les projections sont suivies d'échanges avec des chercheurs venus du monde entier.

Nancy (Meurthe-et-Moselle), Parc de la Pépinière. www.filmdechercheur.eu

Le 11 juin, 15 h 30

La biodiversité des grands fonds menacée

Conférence. Les grands fonds marins abritent une grande diversité d'espèces, encore mal connues mais menacées par l'exploitation de ressources minérales, Lenaïck Menot de l'Ifremer montre que la mise en œuvre de stratégies de protection adaptées à chacune de ces espèces exige une meilleure connaissance de leurs spécificités.

Plouzané (Finistère), Centre Ifremer Bretagne. wwz.ifremer.fr/brest/Conferences-grand-public

Le 11 juin, 19 h 30

Météo des méduses en Méditerranée

Conférence. Depuis 2000, le biologiste marin Gabriel Gorsky s'intéresse au rôle des méduses dans les écosystèmes marins, et plus particulièrement de *Pelagia noctiluca*, la méduse la plus urticante en Méditerranée. Son équipe cherche à prévoir les pullulations de cette espèce sur nos côtes pour proposer un « bulletin météo des méduses ».

Paris, Institut océanographique. http://tinyurl.com/conf-meduses-paris

Le 12 juin, 19 h

Observer le ciel depuis l'espace

Conférence. L'espace offre des possibilités immenses aux astronomes pour observer l'Univers. Mais les défis techniques sont nombreux. Sébastien Vives, ingénieur au Laboratoire d'Astrophysique de Marseille, dresse un panorama des télescopes spatiaux actuellement en opération, et explique les défis techniques à relever pour la future génération.

Aix-en-Provence (Bouches-du-Rhône), villa Clair-Matin. http://tinyurl.com/conf-peiresc-2014

à ne pas manquer

Journées nationales de l'archéologie

Pendant trois jours, des archéologues vous invitent à vous familiariser avec les différents aspects de leur travail. Partout en France, l'Institut de recherches archéologiques préventives mobilise chercheurs, musées, ou laboratoires pour proposer des activités tout public autour de nombreux sites archéologiques. Initiez-vous à la céramologie à Urepel ou aux fouilles à Villevieille, apprenez à reconstituer des inscriptions latines à Thionville, visitez l'exposition Froids de mammouth à Meung-sur-Loire, ou encore découvrez les techniques de l'archéologie expérimentale à Mametz. Vous pouvez aussi profiter des portes ouvertes sur un chantier de fouilles à Saintes ou remonter le temps avec le spectacle Bac à fouilles à Montans.

JOURNÉES NATIONALES DE L'ARCHÉOLOGIE 6, 7, 8 JUIN 2014

Du 6 au 8 juin. http://journees-archeologie.fr

Voyages naturalistes

> LE BAR DES SCIENCES de Montpellier célèbre la grande époque des voyages naturalistes et de l'engouement pour les cabinets de curiosité, au XVIIIe siècle. Le 5 juin, à la Cité des savoirs Pierresvives, à partir de 20 h 30, le public est invité à découvrir l'histoire des premières grandes expéditions et les missions actuelles des chercheurs. Laurent Pouyaud, de l'Institut de Recherche pour le développement, coordinateur d'une mission d'exploration en Indonésie, François Catzeflis, de l'Institut des sciences de l'évolution de Montpellier, ayant travaillé en Guyane et l'historien des sciences Pierre-Yves Lacour, spécialiste des cabinets de curiosité, répondent aux questions, ainsi que plusieurs chercheurs en duplex de l'Institut français du Maroc.

> www.barsciences.fr

Le 14 juin, de 9 h 30 à 18 h

Vieillissement : la naissance d'une nouvelle société

Forum. C'est un phénomène inédit dans l'histoire de l'humanité : grâce à l'amélioration de la qualité de vie, la proportion des plus de 60 ans augmente, tandis que celle des moins de 15 ans diminue. Cette révolution démographique oblige la société à s'adapter. Le public est invité à participer à la réflexion sur cette adaptation avec les chercheurs présents.

Paris, Cité des sciences et de l'industrie. www.cite-sciences.fr/fr/cite-des-sciences

Le 14 juin, 16 h 30

Natura Maxima

Visite d'exposition. L'Équateur abrite, pour de nombreux groupes de plantes et d'animaux, la biodiversité la plus dense observée sur le globe. L'écologue Olivier Dangles propose une visite commentée de cette exposition de photos pour découvrir d'innombrables espèces ayant fasciné les scientifiques depuis des siècles. L'exposition se poursuit jusqu'au 21 juin.

Marseille (Bouches-du-Rhône), bibliothèque de l'Alcazar. http://tinyurl.com/marseille-natura-maxima

Le 16 juin, 19 h

Nutrition santé : approche épidémiologique

Conférence. Comment la nutrition joue-t-elle sur les maladies ? Les incertitudes sur ces liens sont légion et on est bien loin d'un consensus scientifique. Pour avancer sur cette question, des études suivent de grands échantillons de population à long terme. L'épidémiologiste Emmanuelle Kesse-Guyot présente l'étude Nutrinet-Santé, commencée en 2009, ses méthodes et ses objectifs.

Aubervilliers (Seine-Saint-Denis), salle des Quatre-chemins. http://tinyurl.com/manger-social-2014

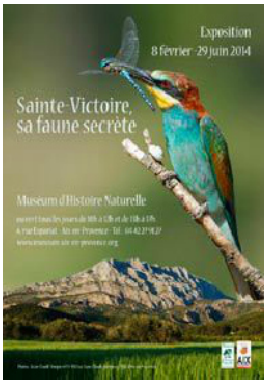
Jusqu'au 29 juin

Espèces en folie

Exposition. L'introduction d'espèces exotiques à caractère envahissant, comme les silures ou les ragondins, constitue la deuxième cause d'appauvrissement de la biodiversité dans le monde. L'exposition retrace l'histoire de ces invasions, depuis la sédentarisation des peuples jusqu'à leur apogée à la fin du XXe siècle et leurs conséquences, aussi bien positives que négatives.

Angers (Maine-et-Loire), Muséum des sciences naturelles. http://tinyurl.com/expo-especes-angers

Jusqu'au 29 juin



Sainte-Victoire, sa faune secrète

Exposition. Nul besoin d'aller sous les tropiques pour trouver des espèces remarquables ! La montagne Sainte-Victoire est riche en espèces rares ou menacées, des papillons aux grands mammifères, en passant par les oiseaux et chauves-souris. L'exposition, qui présente des spécimens naturalisés, invite à découvrir la richesse de cette faune remarquable.

Aix-en-Provence (Bouches-du-Rhône), Muséum. www.museum-aix-en-provence.org

Le mois prochain dans La Recherche

Numéro spécial
Qu'est-ce que le réel ?

Que comprenons-nous de l'Univers qui nous entoure ? Que sait-on de la réalité ? À l'échelle fondamentale, le monde matériel est décrit par le modèle standard des particules élémentaires : même s'il échappe à nos sens, un électron est aussi réel que le magazine entre vos mains. Pour certains, l'Univers est d'ailleurs uniquement mathématique. D'autres affirment que tout n'est qu'échange d'informations, comme dans un ordinateur. Chaque vision a ses limites. Aujourd'hui, en cherchant à le simuler, beaucoup espèrent approcher ce réel aux contours mouvants.

Et aussi
Faut-il supprimer le code minier ?

Un entretien avec Arnaud Gossement, avocat spécialisé en environnement.

N° 489 • EN VENTE LE 26 JUIN 2014

Voir rouge

Vert de rage ? Colère noire ? La couleur des gens agressifs serait en fait le rouge. Dans une étude parue dans la revue *Journal of Personality*, qui cherchait à vérifier cette hypothèse, 376 étudiants ont été invités à décliner leur couleur préférée. Puis, un test psychologique a montré que les personnes attirées par le rouge étaient les plus agressives. Les étudiants ont alors participé à deux expériences. D'abord, on leur a demandé quelle était la couleur qui dominait, selon eux, dans une image constituée de rouge et de bleu délavés.

En croisant leurs réponses avec les résultats du test psychologique, il est apparu que les plus agressifs voyaient plutôt ressortir du rouge. Dans la seconde expérience, les étudiants « rouges » ont expliqué préférer se défendre en cas d'agression plutôt que s'enfuir. Avec sa *Vie en rose* Edith Piaf avait-elle déjà tout compris ?
http://tinyurl.com/couleur-journal-personality

Café-clope

Le duo café-cigarette, plébiscité par les amoureux d'une petite pause en terrasse, ne formerait pas une paire de si bon goût. En effet, il semblerait que les amateurs de tabac ne soient plus en mesure d'apprécier autant le goût d'un expresso ou d'un cappuccino que les non-fumeurs. D'après une étude française, fumeurs et anciens fumeurs ont plus de difficultés à percevoir l'amertume que ceux n'ayant jamais touché à la nicotine. Les fumeurs peuvent toujours se rassurer en apprenant que les saveurs aigres, sucrées et salées ne sont pas altérées par la clope.
http://tinyurl.com/cafe-cigarette-gout

Deux veaux mieux qu'un

La solitude n'est pas bonne pour le petit de la vache. Une publication parue dans *PlosOne* conclut que les veaux élevés seuls affichent des performances cognitives inférieures à celles de leurs camarades ayant grandi à deux. Face à un nouvel objet, en l'occurrence une terrifiante poubelle en plastique rouge, présentée à plusieurs reprises pendant deux jours, les réactions divergent. Les veaux confrontés seuls à la nouveauté n'ont pas semblé s'y habituer au fil des présentations successives. En revanche, en binôme, ils y ont prêté de moins en moins d'attention. Dans une autre expérience, les animaux avaient été conditionnés à associer le blanc à une récompense et le noir à l'absence de rétribution. Puis, les chercheurs avaient inversé les règles. Là encore, les tandems ont mis moins de temps à comprendre comment obtenir des gratifications que leurs semblables isolés. L'étude ne dit pas si la viande des duos est, elle aussi, deux fois plus goûteuse. http://tinyurl.com/veaux-cognition-binome

Trahi par sa voix

Etes-vous perçu comme honnête, agressif, compétent ou dominateur ? Des chercheurs écossais ont montré que, selon le son de votre voix ceux qui vous rencontrent pour la première fois se font un avis sur votre personnalité dès le début de la conversation. Quelques centaines de millisecondes suffisent. En tout cas, c'est le temps qu'il a fallu à 320 cobayes pour évaluer une voix sur une échelle de 1 (ne correspond pas) à 9 (correspond parfaitement) selon dix traits de caractères. À partir de 64 enregistrements du mot « hello » prononcés par autant de personnes différentes, l'étude a montré qu'une même voix était jugée de la même façon par une grande partie des participants. Aussi, apprend-on, grâce à cette expérience, qu'un homme semble plus fiable s'il hausse le ton à la fin des mots. À bon entendeur...
http://tinyurl.com/voix-personnalite

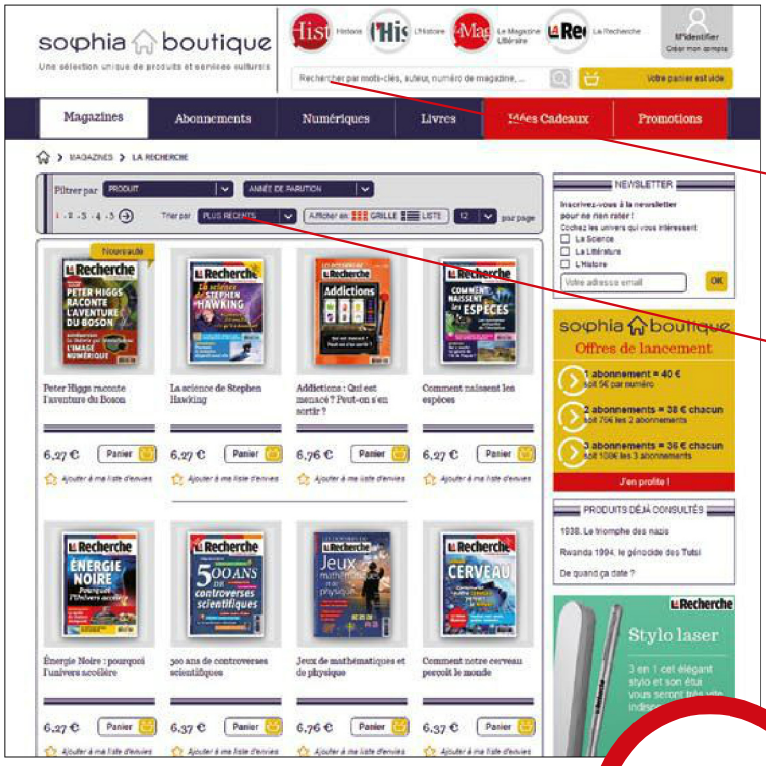
© ASIA IMAGES GROUP/GETTY - HARALD BIEBEL/AGE - ILLUSTRATION MARC FERSTEN

NOUVEAU !

La Recherche lance

www.sophiaboutique.fr

Retrouvez l'intégralité des produits disponibles de **La Recherc**
papier et numérique, livres, Ebooks, voyages et conférences… mais aussi une sélection de produits recommandés par nos auteurs et spécialistes.



ACTUELLEMENT
Livraison offerte à partir de 49 € d'achat

- + de 5 000 articles culturels autour des univers de l'histoire, de la littérature et des sciences
- De nombreux critères de sélection pour affiner votre recherche
- Une navigation facilitée par un moteur de recherche avec suggestion de mots-clés

Et tout au long de l'année, des promotions jusqu'à 50% de remise sur vos produits préférés, des déstockages à partir de 1,90 € et plein d'autres avantages.

Connectez-vous vite sur www.sophiaboutique.fr pour bénéficier des **promotions** et **déstockages** du moment.

Une sélection unique de produits et services culturels

Livraison à domicile rapide
NOUVEAU ! livraison en Point Relay

Paiement sécurisé

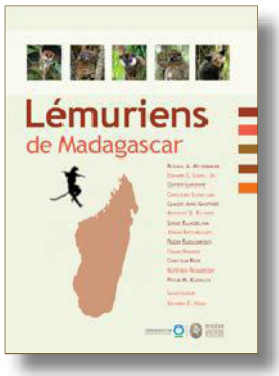
Satisfait ou remboursé

100% des articles en stock

MUSÉUM

NATIONAL D'HISTOIRE NATURELLE

à paraître



mai 2014
175 x 240 mm
reliure integra
842 p. tout couleur
65€ TTC
ISBN 978-2-85653-747-3
hors collection

LES LÉMURIENS DE MADAGASCAR

sous la direction de Russel **Mittermeier** *et al.*

Madagascar, véritable laboratoire de l'évolution pour la faune et la flore, est le 2ème pays au monde en matière de diversité de primates (bien qu'il représente moins de 7% de la surface du premier pays, le Brésil) avec 98 espèces endémiques. C'est aussi un pays fragile dont les richesses naturelles s'érodent très rapidement. Ainsi, en 2012, l'UICN a révélé une hausse dramatique du nombre de lémuriens menacés d'extinction. Avec 15% des espèces et sous-espèces de primates connus au monde, 20% des genres et 36% des familles, la responsabilité du pays en terme de conservation n'en est que plus grande.
Cet ouvrage synthétise les données disponibles concernant l'écologie, la répartition et le statut de conservation des lémuriens, et permet leur identification dans la nature. Il espère contribuer ainsi au développement de l'écotourisme à Madagascar, encourager la poursuite de nouvelles recherches et l'augmentation des connaissances sur la biologie des lémuriens. D'un usage facile, il est conçu pour être une référence pour les écotouristes et les primatologues amateurs. Les 102 taxons actuellement connus sont richement illustrés et la répartition géographique, l'écologie et le comportement de chacun d'eux sont décrits en détail. Un repère en couleur sur la tranche de l'ouvrage permet rapidement de visualiser les cinq familles de lémuriens actuels.
Les six premiers chapitres présentent l'histoire géologique de l'île, comment les lémuriens y sont arrivés, les espèces éteintes, la découverte et l'étude des lémuriens actuels ainsi que les enjeux de leur conservation. Les chapitres 7 à 11 constituent l'essentiel de l'ouvrage et fournissent les données détaillées sur les 102 espèces et sous-espèces. Enfin les annexes offrent de nombreuses cartes présentant la topographie de l'île, ses régions biogéographiques et domaines floristiques, et répertorient les lieux où peuvent être observés ces lémuriens dans leur habitat naturel. La riche bibliographie permet au lecteur d'approfondir et d'élargir encore ses connaissances.

juin 2014
190 figures couleur
170 x 240 mm broché
416 p. • 39€ TTC
ISBN 978-2-85653-746-6
collection **archives**

PENSER, CLASSER, ADMINISTRER

pour une histoire croisée des collections scientifiques

coordonné par Bertrand **Daugeron** & Armelle **Le Goff**

Des pans entiers du patrimoine scientifique conservé aujourd'hui dans des institutions publiques connaissent des transformations, transferts ou restructurations. Si ces opérations semblent s'imposer, cette «impérieuse» nécessité de transformation n'est pas neutre. Dans les mouvements entre conditions de collecte, impératifs de rangement et logiques de classement menacent le désordre et la perte. Un musée conserve, mais il peut aussi détruire. Bien que les collections s'inscrivent dans une histoire qui leur est propre entre la collecte, son contexte et leur exploitation, cette dimension du temps est comme effacée entre l'objet et sa documentation. Les conséquences scientifiques de ces transformations sont ici mises en lumière à partir de différents terrains —botanique, paléontologie, préhistoire, archéologie, anthropologie, ethnologie. Les auteurs s'attachent à reconstituer les logiques de rangements, d'écritures et de classements qui ont fait et défait les collections scientifiques. Le regard interdisciplinaire permet de restituer la complexité de l'histoire des collections, et ainsi, de réaffirmer avec vigueur l'importance et les enjeux de la conservation du patrimoine scientifique, part du patrimoine de l'humanité.
Penser, classer, administrer les collections est le fruit d'une collaboration entre le programme interdisciplinaire de recherche «PCA Collections» financé par l'Institut des sciences de la communication du CNRS et hébergé par le Centre Alexandre Koyré, et le symposium «Aux sources de l'histoire de l'anthropologie de la fin du XVIIIe siècle à la veille de la Première Guerre mondiale: une anatomie des archives», organisé par les Archives nationales en collaboration avec la Société française pour l'histoire des sciences de l'homme.

ouvrages disponibles
à la librairie des Publications Scientifiques
face à la Grande Galerie de l'Évolution

Commandes et renseignements
Muséum national d'Histoire naturelle
Publications scientifiques
Case postale 41 – 36, rue Geoffroy
57, rue Cuvier 75005 Paris Cedex 05
Tél. 01 40 79 48 05 • Fax 01 40 79 38 40
diffusion@mnhn.fr

MUSÉUM
NATIONAL D'HISTOIRE NATURELLE
PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES
MNHN.FR